

# Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme  
Universität Stuttgart  
30. Januar 2019

*Eine Uhr, die auf Schiffen pro Tag  
auf zirka drei Sekunden genau geht,  
ist undenkbar.*

*Isaac Newton, 1714*



# Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme  
Universität Stuttgart  
30. Januar 2019

*Du hast nichts anderes im Kopf,  
als Käfer sammeln, Jagen und  
Ratten fangen  
und wirst dir und der ganzen Familie  
nichts als Schande machen.*

*Robert Waring Darwin, 1821,  
Vater von Charles*



# Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme  
Universität Stuttgart  
30. Januar 2019

*Bakterien sind Hirngespinnste.*

*Rudolf Virchow, 1870*



# Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme  
Universität Stuttgart  
30. Januar 2019

*Von der Fotografie in natürlichen Farben  
ist leider nicht nur für die nächste  
Folgezeit,  
sondern aus theoretischen Gründen auch  
für alle Zukunft  
so gut wie nichts zu erwarten.*

*Emil du Bois-Reymond, 1890*





# Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme  
Universität Stuttgart  
30. Januar 2019

*Diese Strahlen des Herrn Röntgen werden  
sich als Betrug herausstellen.*

*William Thomson (Lord Kelvin), 1897*



# Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme  
Universität Stuttgart  
30. Januar 2019

*Alles, was erfunden werden kann,  
wurde bereits erfunden.*

*Charles Duell, US Patentamt, 1899*



# Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme  
Universität Stuttgart  
30. Januar 2019

***Die weltweite Nachfrage nach  
Kraftfahrzeugen wird eine Million nicht  
überschreiten –  
allein schon aus Mangel an verfügbaren  
Chauffeuren.***

***Gottlieb Daimler, 1901***



# Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme  
Universität Stuttgart  
30. Januar 2019

*Das Pferd wird es immer geben.  
Das Automobil ist nur eine  
vorübergehende Erscheinung.*

*Wilhelm II., 1906*



# Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme  
Universität Stuttgart  
30. Januar 2019

*Flugzeuge sind interessant,  
haben aber keinerlei militärischen Wert.*

*Marschall Ferdinand Foch, 1911*



# Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme  
Universität Stuttgart  
30. Januar 2019

*Es gibt nicht das geringste Anzeichen,  
dass wir jemals Atomenergie entwickeln  
können.*

*Albert Einstein, 1932*



# Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme  
Universität Stuttgart  
30. Januar 2019

*Ich denke, dass es einen Weltmarkt für  
vielleicht fünf Computer gibt.*

*Thomas J. Watson, IBM, 1943*



# Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme  
Universität Stuttgart  
30. Januar 2019

*Für einen Reporter, der unterwegs  
Notizen aufschreiben will, mag das  
interessant sein.  
Aber für den Durchschnittsnutzer sind  
tragbare Computer unnütz, und es gibt  
auch kaum Software dafür.*

*Steve Jobs, 1985*





# Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme  
Universität Stuttgart  
30. Januar 2019

*Das Werk [in Tschernobyl] verfügt über sichere und zuverlässige Kontrollen, so dass die Reaktoren gegen jede Störung mit drei Sicherheitssystemen, die unabhängig voneinander arbeiten, geschützt sind.*

*Vitali Sklyarow, Energieminister der Ukraine, 1986*



# Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme  
Universität Stuttgart  
30. Januar 2019

*Die Zeitung ist im Jahr 2000 tot.*

*Bill Gates, 1998*



# Laserantriebe

## Unkonventionelle Antriebe

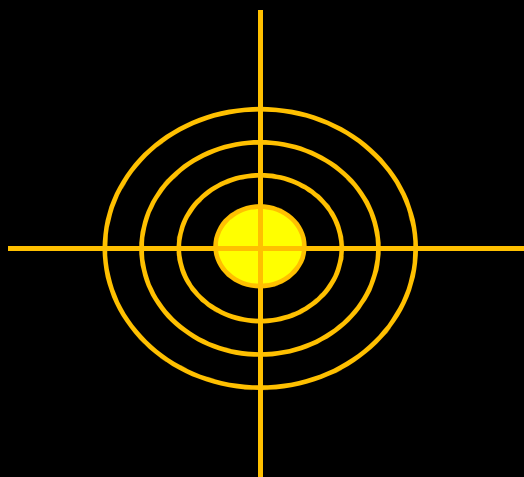
Institut für Raumfahrtssysteme  
Universität Stuttgart  
30. Januar 2019

Dr. Stefan Scharring

Institut für Technische Physik, Stuttgart

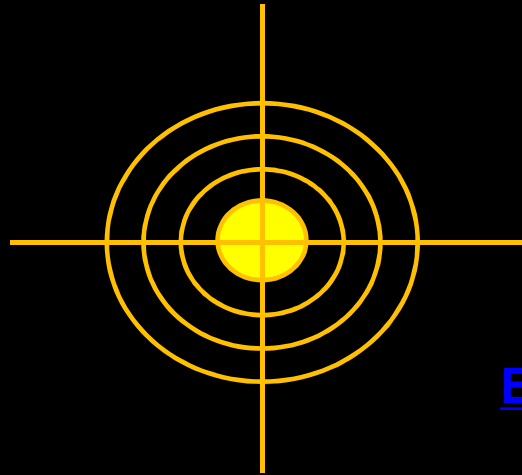
Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.





## Experiment 1:

- Schubkraft: max. 6.7 pN
- Leistung Laserpointer:  
< 1 mW



## Optimierungspotenzial:

- Steigerung der Laserausgangsleistung
- Fokussierung der Laserstrahlung
- Verwendung kurzer Laserpulse
- Anpassung von Material und Wellenlänge

## Experiment 2 (CLEANSPLACE):

- Mittlere Laserleistung: 33 W
- 3 ns Pulse: 94 MW (Puls)
- 3 mm Fokus: 190 MW/mm<sup>2</sup>
- Aluminium,  $\lambda = 1064$  nm
- Energiedichte: 4.7 J/cm<sup>2</sup>
- Schubkraft: 700  $\mu$ N

## Motivation

Upload von  
Antriebsenergie  
*MW*

Minimaler  
Treibstoffverbrauch  
*<1 %*

Satelliten präzise  
positionieren  
*nm -  $\mu$ m*

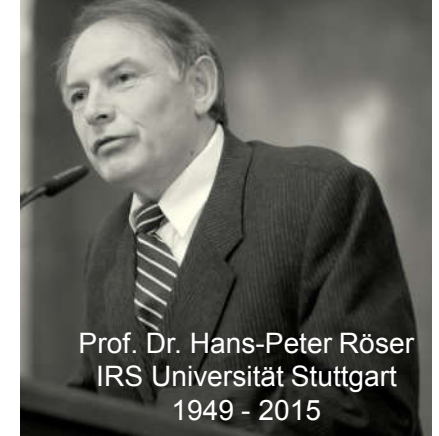
Weltraumschrott aufspüren  
und verglühen lassen  
*cm - dm*



*Wenn Du ein Schiff bauen willst,  
dann trommle nicht Männer zusammen,  
um Holz zu beschaffen, Aufgaben zu vergeben und die  
Arbeit einzuteilen,  
sondern lehre die Männer die Sehnsucht nach dem  
weiten, endlosen Meer.*

*Antoine de Saint-Exupery.*

Raumfahrt aus Leidenschaft



Prof. Dr. Hans-Peter Röser  
IRS Universität Stuttgart  
1949 - 2015



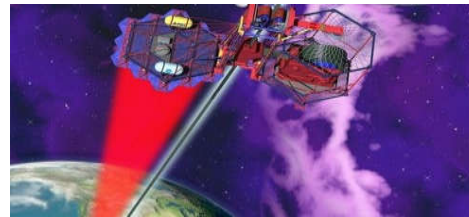


## 1 Einleitung

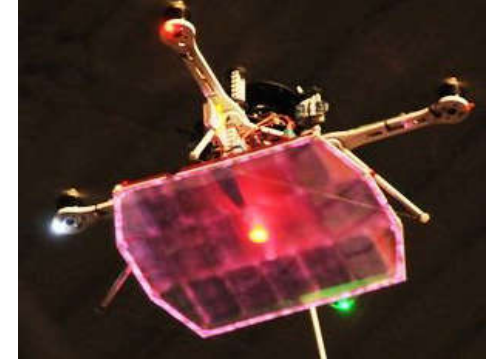
## Science vs. Fiction

Laserschneiden  
von Stahl

Laserschwert



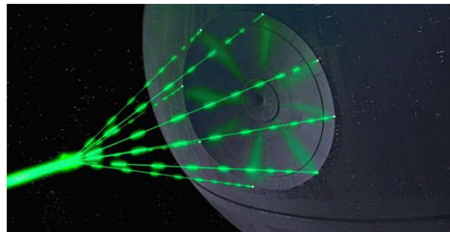
Weltraumfahrstuhl



Quadrocopter



Augen-OP (Lasik)



Todesstern



Photonenantrieb



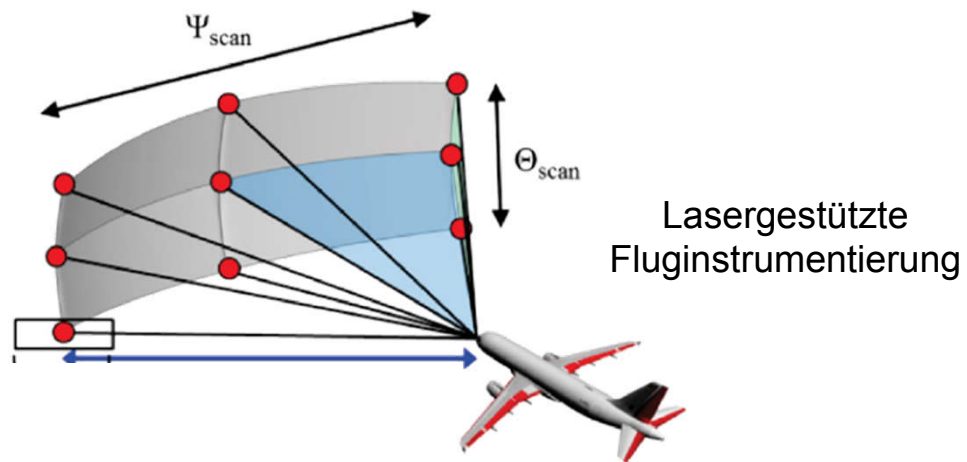
Lasersegel

Myrabo et al, Laser-boosted light sail experiments with the 150-kW- LHME II CO<sub>2</sub> laser, Proc. SPIE **4760**, 774-798, (2002)



# DLR – Institut für Technische Physik

Institutsleitung: Prof. Dr. Thomas Dekorsy





# Geschichte



Eugen Sänger



Arthur Kantrowitz

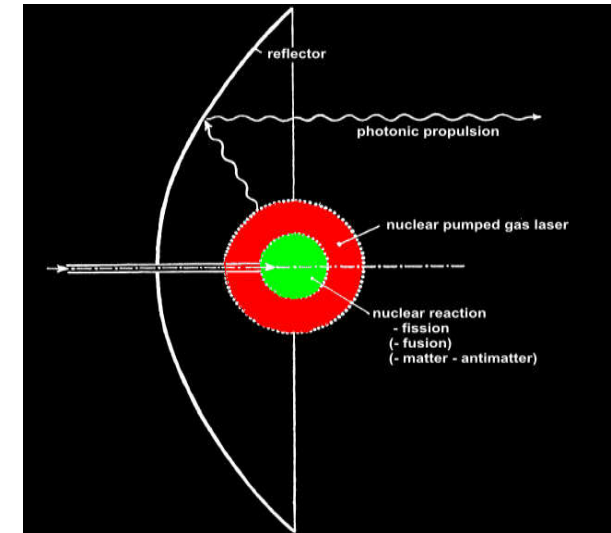
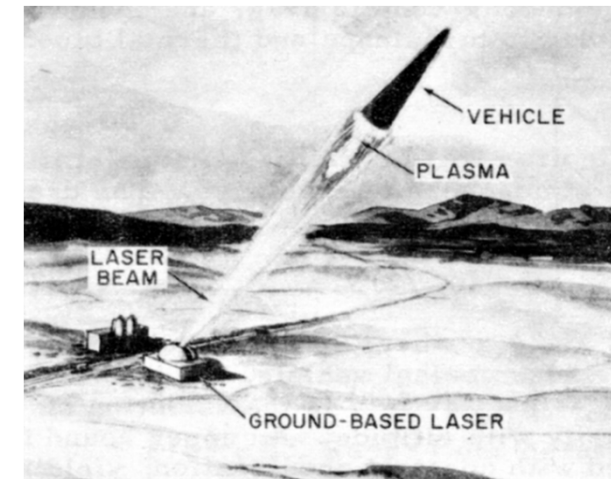


Leik Myrabo



Claude Phipps

1953	E. Sänger	Konzept Photonenrakete
1967	G.A. Askarian	Laser-ablativer Impulsübertrag
1972	A.Kantrowitz	Konzept bodengestützter Laserantrieb
1991	Schall	Laser-basierte Beseitigung von Weltraummüll
1995	Liukonen	Flug im Labor (CO <sub>2</sub> -Laser)
1997	Myrabo	Freiflug
1998	DLR	Vertikalflug im Labor
2000	Myrabo	Weltrekordflug, 71 m
2002	Phipps	Konzept des laser-ablativen Mikroantriebs
2006	Bae	Photonischer Laserantrieb

W.L. Bohn, Laser Propulsion – Quo Vadis, AIP Conf. Proc. **997**: 47 – 55 (2008)

Pirri et al, Laser propulsion, AIAA paper 72-719 (1972)



## Definitionen und Beispiele

### Definition Laserantrieb:

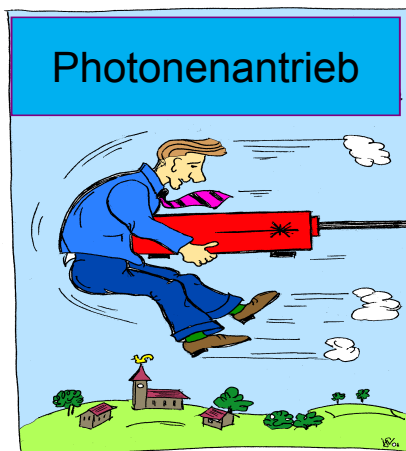
Antrieb, bei dem die Laserenergie einen substantiellen und unverzichtbaren Beitrag zur Bewegungsenergie liefert

### Allgemeine Definition Lightcraft:

Antrieb, der auf gerichteter elektromagnetischer Strahlung beruht (Laser oder Mikrowelle)

### Lightcraft im engeren Sinne:

Antrieb durch laser-gestützte Detonationen mit räumlich getrennter Laserquelle



# Beamed Energy Propulsion – onboard laser



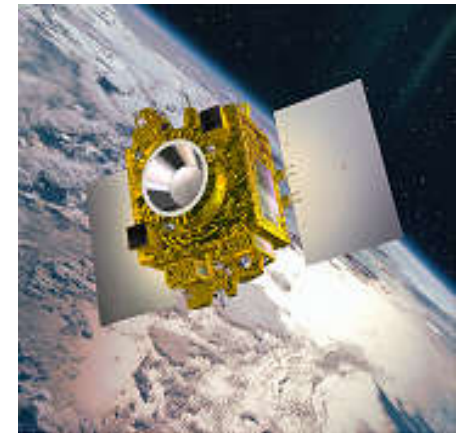
GRACE: © NASA/JPL-Caltech

Alternative Lageregelung im sub- $\mu\text{N}$  bis mN-Bereich für

- wissenschaftliche Missionen
- Formationsflüge zur Erdbeobachtung

Vollständige Vermeidung beweglicher Komponenten für

- langjährige Betriebsdauer
- *trägheitsfreien Betrieb*



MICROSCOPE: © CNES

Minimale Restbeschleunigung  $< 10^{-14} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$

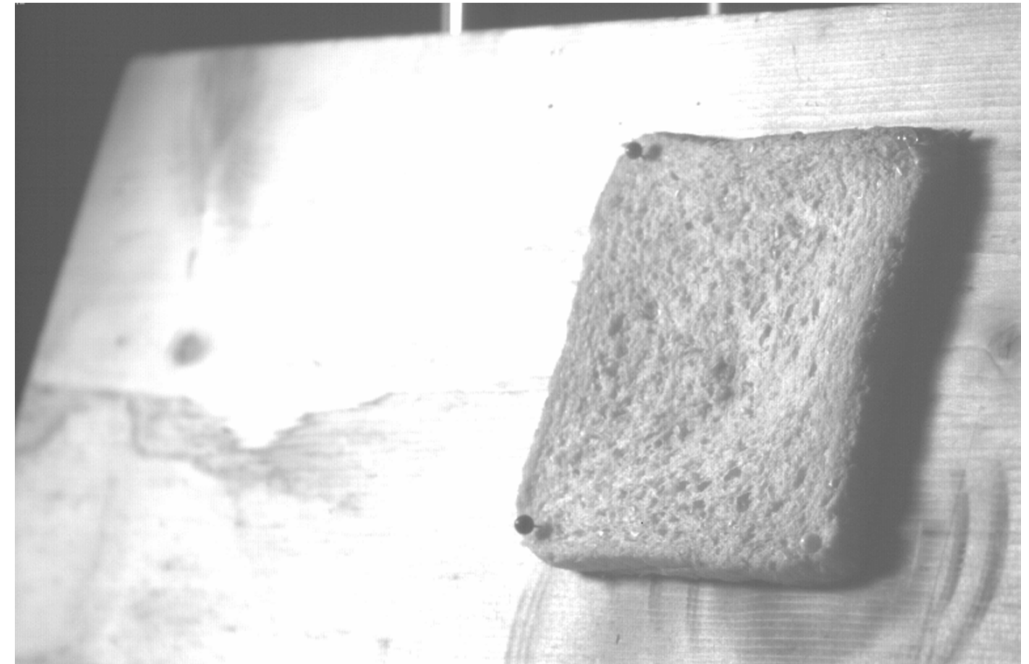
Dittus et al, Applications of Microthrusters for Satellite Missions and Formation Flights Scenarios, Beamed Energy Propulsion, AIP Conf. Proc. **1402**, 367-373 (2011)



## 1 Einleitung

### Beispiel: Rückstoß durch Materialabtrag („*unkooperatives Target*“)

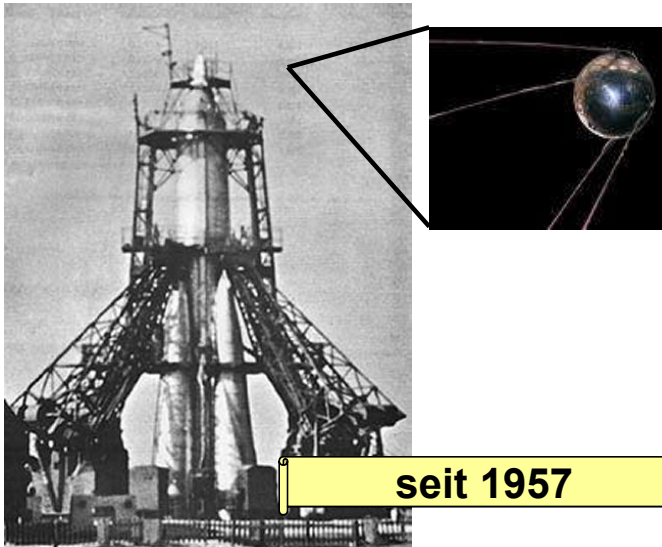
- Mittlere optische Leistung: 7,5 kW
- Laserpuls:  $\sim 10 \mu\text{s}$ , 150 J
- Leistungsdichte, **unfokussiert**:  
 $\sim 290 \text{ kW} / \text{cm}^2$   
(solar:  $140 \text{ mW} / \text{cm}^2$ )
- Repetitionsrate: 50 Hz
- Laserstrahldurchmesser: 8 cm





# Beamed Energy Propulsion – Ground-based Laser

## Transport des Energieträgers



seit 1957

Nutzlast: Sputnik-I,  
83,6 kg, 58 cm  
Interkontinentalrakete:  
280 t, 34 m

75 Jahre F&E?

## Externe Energiequelle



\* 2032 ?



seit 1804

75 Jahre F&E

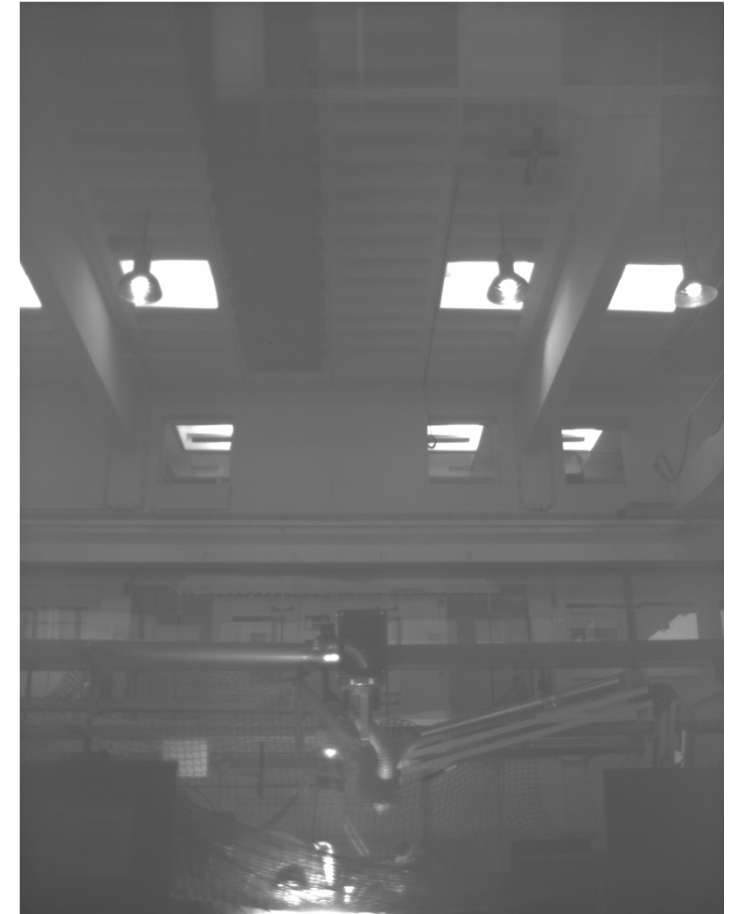
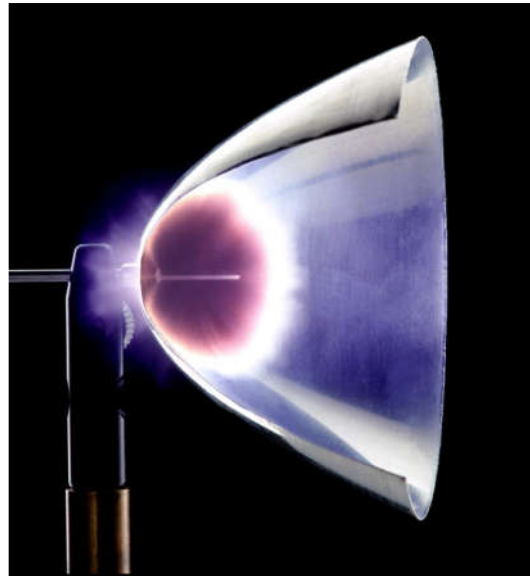


\* 1879

## 1 Einleitung

### Beispiel 2: Schuberzeugung in Düse („*kooperatives Target*“)

- Mittlere optische Leistung: 7,5 kW
- Laserpuls:  $\sim 10 \mu\text{s}$ , 150 J
- Leistungsdichte, **fokussiert**:  
 $3,3 \text{ MW} / \text{cm}^2$
- Repetitionsrate: 50 Hz



# Inhalt

## 1 Einleitung

## 2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Beispiele
- > 2.3 Ausbreitung von Laserstrahlung

## 3 Antriebskonzepte

- > 3.1 Überblick
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > 3.3 Laser Lightcraft

## 4 Zusammenfassung

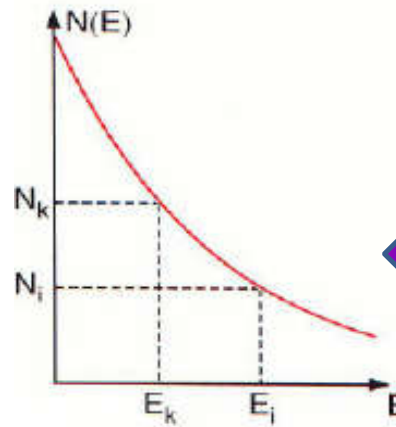


# Stimulierte Emission

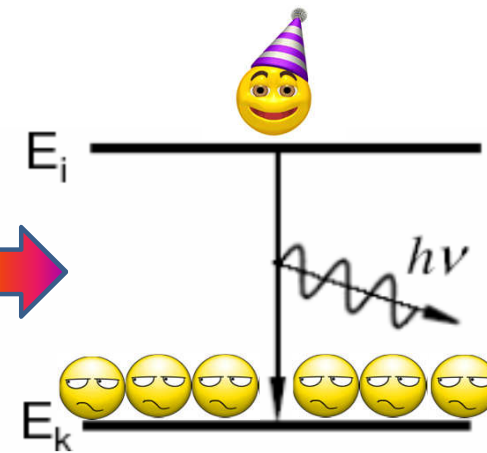


$$E_{rot} = 1/2 \cdot M \cdot \omega^2 R^2$$

Kontinuierliche  
Energieübergänge

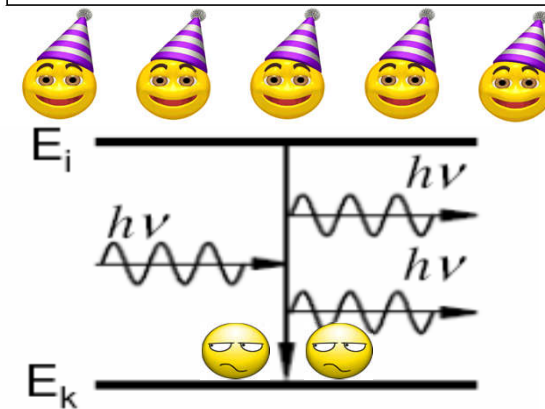


Thermisches Gleichgewicht,  
z.B. für Molekülschwingungen,  
Elektronenzustände

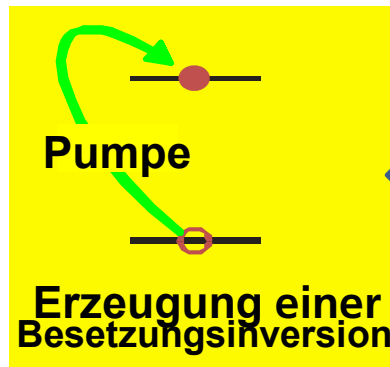


Spontane Emission

Diskrete (quantisierte)  
Energieniveaus

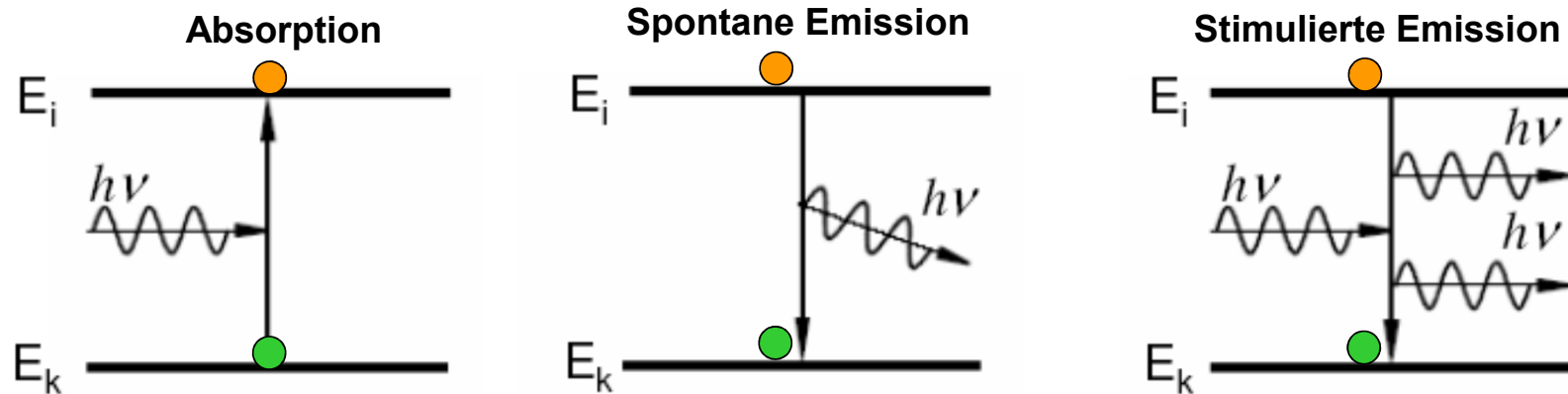


Stimulierte Emission





# Light Amplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

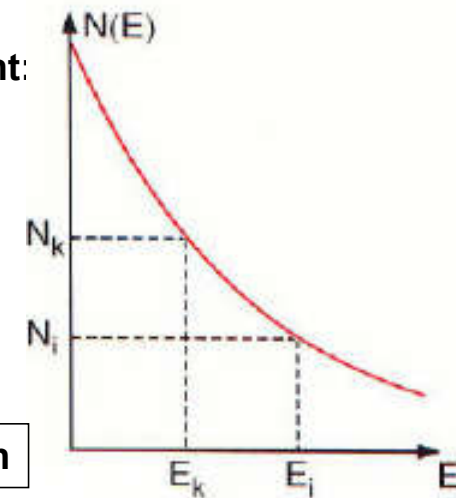


**Besetzung der Energieniveaus im thermischen Gleichgewicht:**

$$\frac{N_i}{N_k} = \frac{g_i}{g_k} e^{-(E_i - E_k)/kT} = \frac{g_i}{g_k} e^{-h\nu/kT}$$

(Boltzmann-Verteilung)

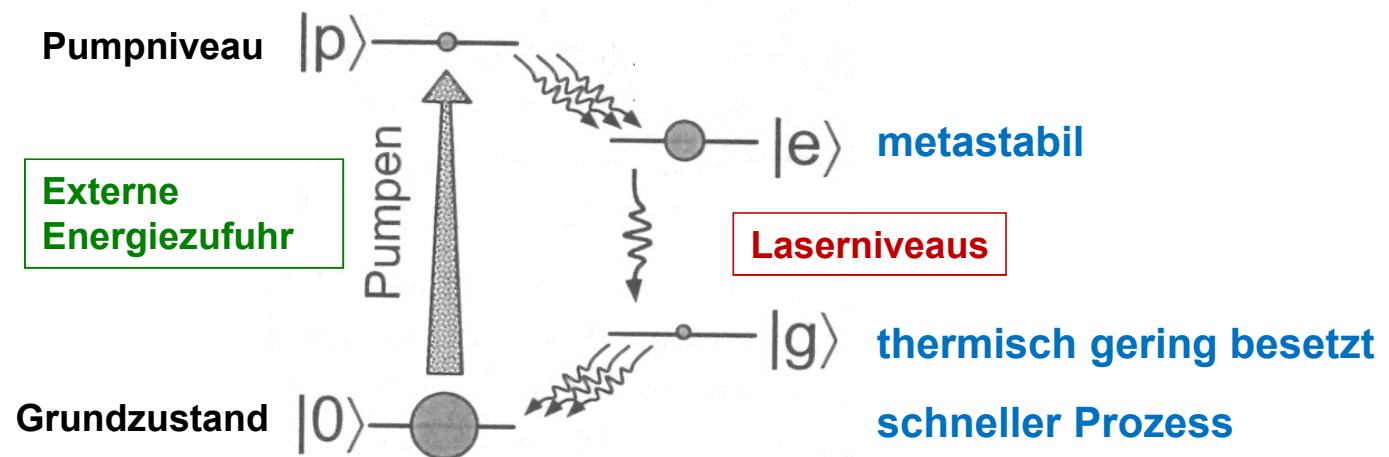
N: Besetzungszahl  
g: Entartung der Energieniveaus



**Lichtverstärkung** ➔ **Besetzungsinversion erforderlich**



# Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



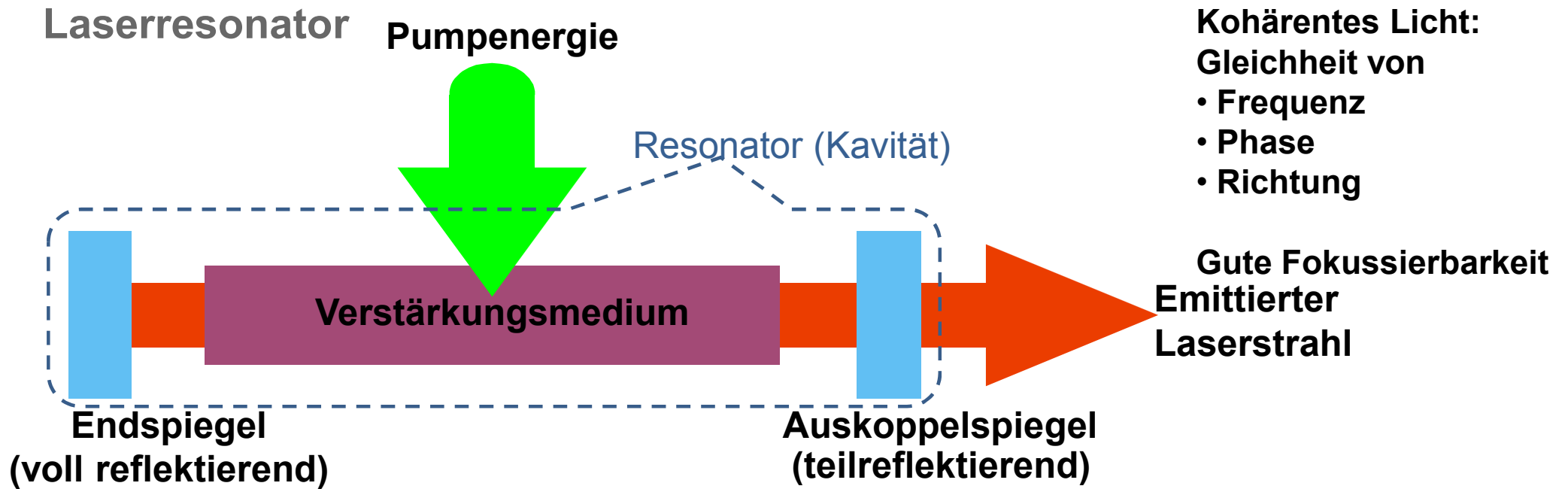
## Pumpprozesse:

- Elektronenstoß
- Stöße zwischen Molekülen
- chemische Reaktionen
- ...

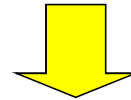
D. Meschede, Optik, Licht und Laser, Teubner-Verlag 1999, Leipzig



## Laserresonator



**Kleinsignalverstärkung (materialspezifisch) >> Absorption**

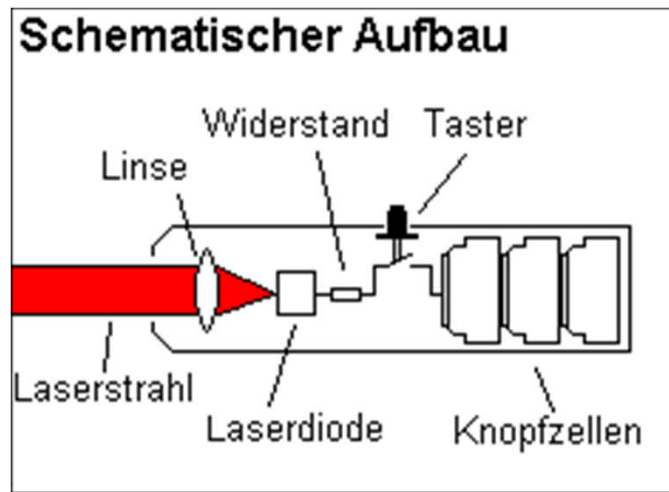


**Lichtverstärkung („Photonenlawine“)**

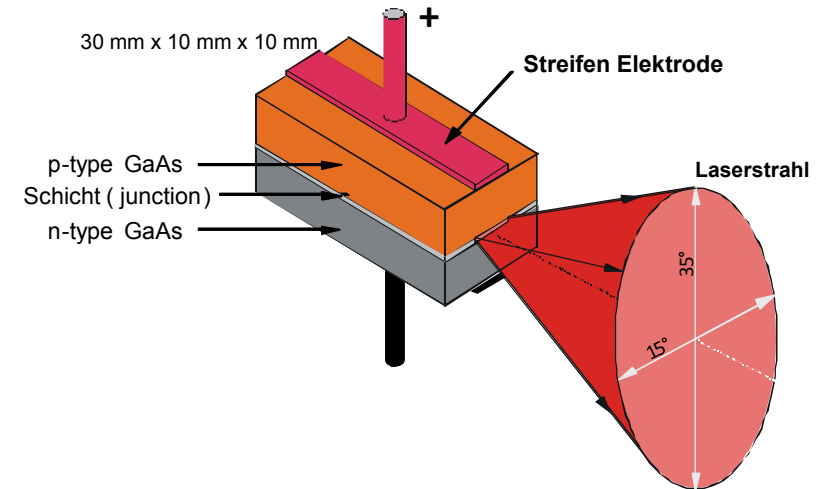


## Halbleiterlaser

- **Lichtemission:** Rekombination am pn-Übergang
- **Pumpprozess:** Gleichstrom
- **Resonator:** Teilreflektierende Endflächen



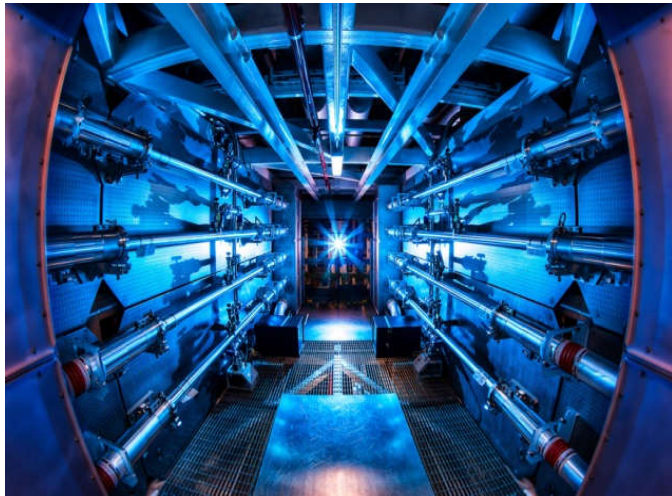
Beispiel: Laserpointer  
 $P_{\text{opt}} < 1 \text{ mW}$ : augensicher  
 bei Lidschlussreflex



- + **hoher Wirkungsgrad (bis 50%, IR)**
- + **Einzelemitter: 100  $\mu\text{W}$  ... 10 W**
- + **kompakte Baugröße**
- **limitierte Strahlqualität**



# Festkörperlaser



National Ignition Facility  
Fusionsexperimente  
> 3 MJ Laserpulsenergie

## Laseraktive Ionen + Wirtsmaterial (Glas, Kristall, Polymer...)

Beispiel: Nd:YAG (Reines 4-Niveau-System)

**Emission** des oberen Laserniveaus  ${}^4F_{3/2}$  (230  $\mu$ s):

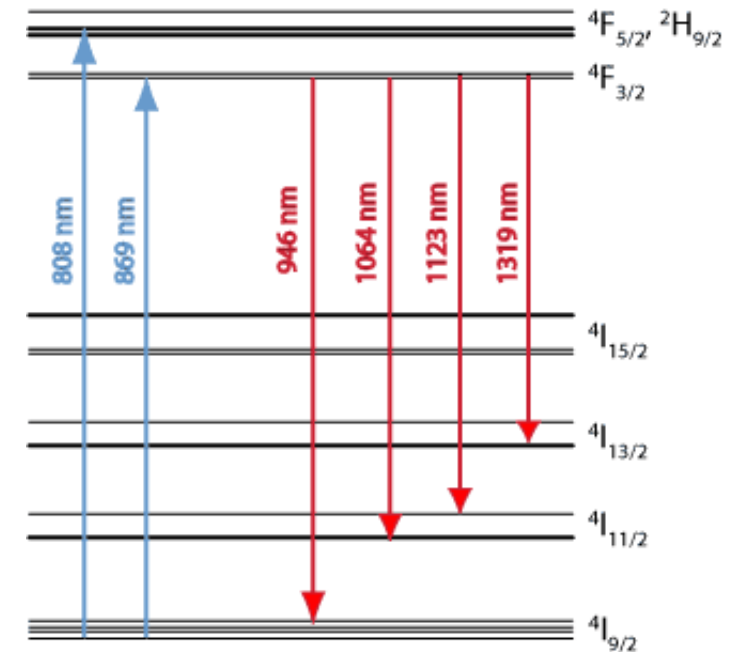
• 1320 nm (~14%) / **1064 nm (~55%)** / 946 nm (~30%)

**Pumpprozess:** optisch (nahes Infrarot)

- Gasentladungslampen
- Laserdioden

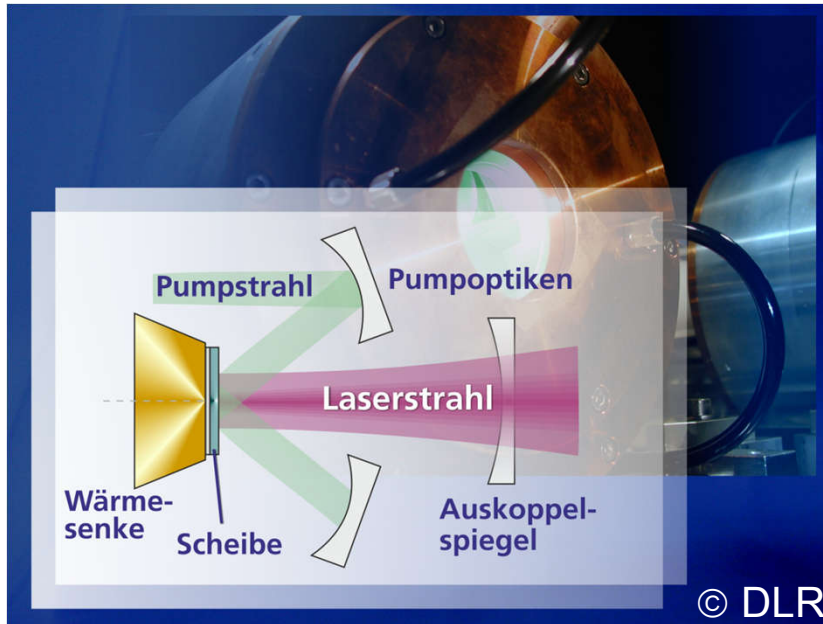
## Thermisches Management?

- Erwärmung
- Ausdehnung
- Brechungsindexgradient

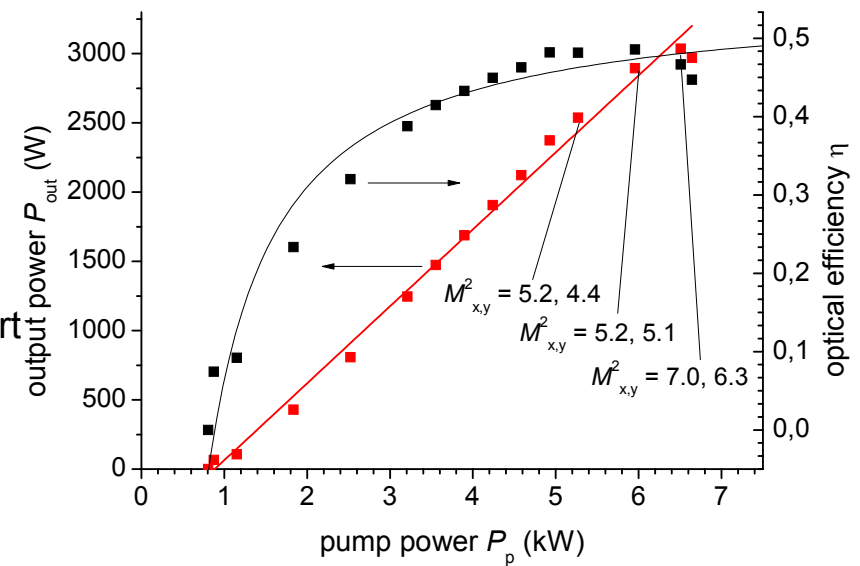
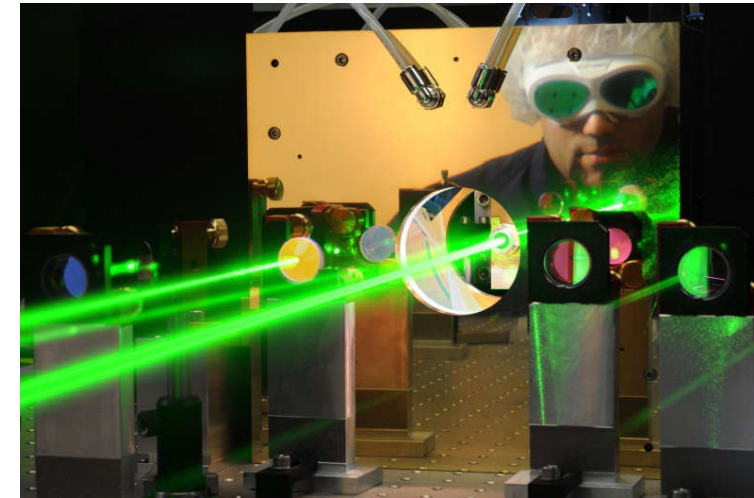




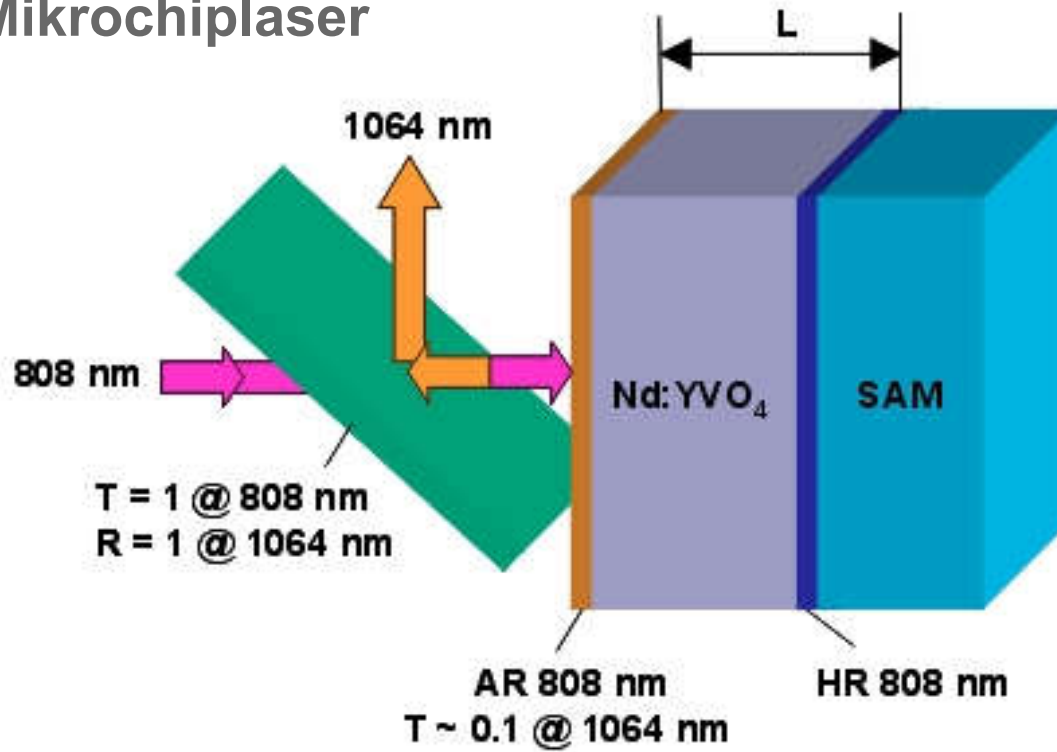
## Scheibenlaser



- Gemeinsame Erfindung DLR-TP / IFSW Uni Stuttgart
- 100 – 200  $\mu\text{m}$  Kristallscheibe, z.B. Yb:YAG
- Pumpmodule: Laserdioden
- cw-Betrieb im kW-Bereich, gut skalierbar
- gepulster Betrieb fs – ns möglich
- hohe Brillanz (Leistung x Strahlqualität)



## Mikrochiplaser



$\tau$  50 ps  
 $f_{rep}$  100 kHz – 3 MHz  
 $E_L$  4 nJ

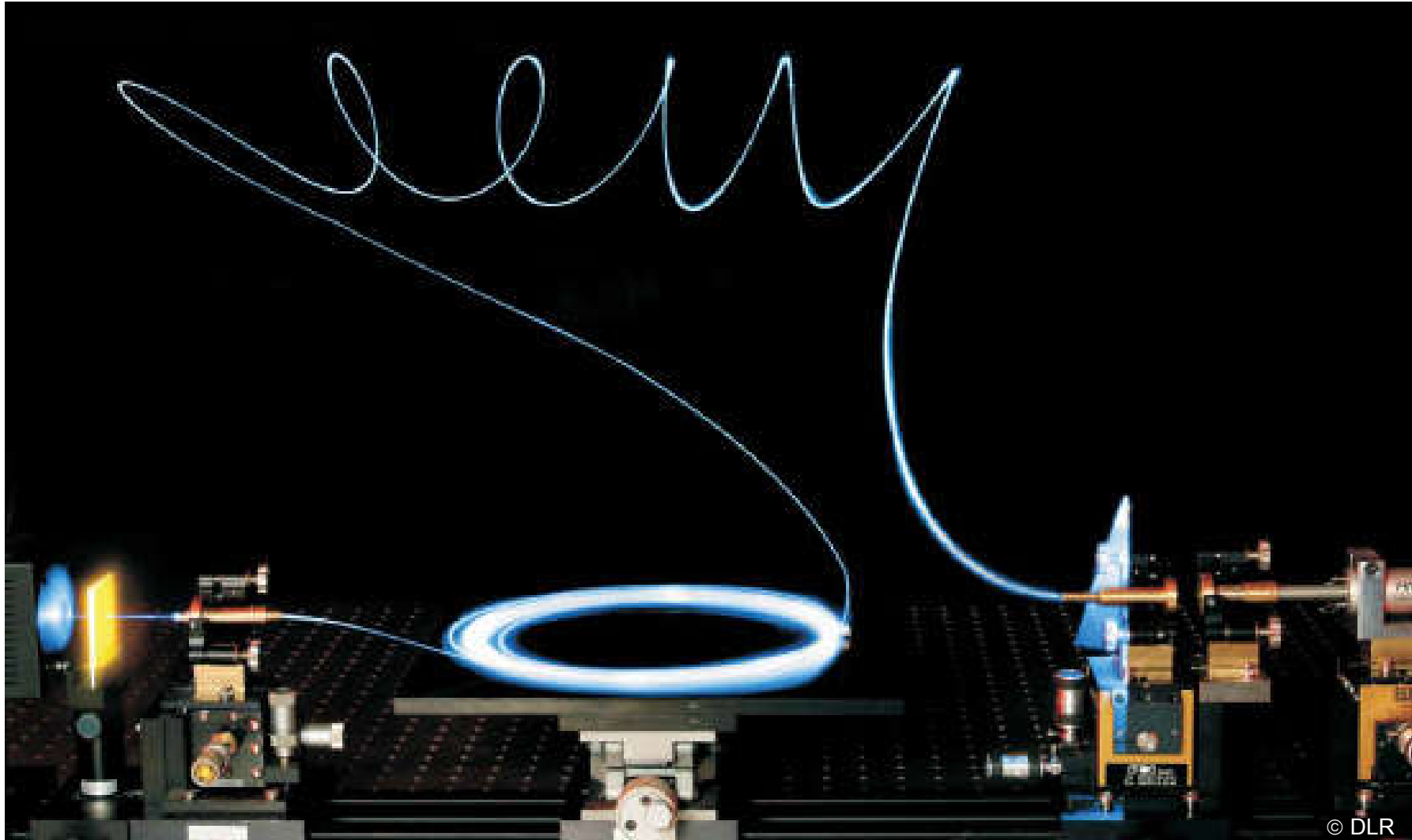
© BATOP optoelectronics, Data sheet microchip MC-1064-50ps



Pumpfleck  $\varnothing$  40 – 80  $\mu\text{m}$



# Faserlaser



© DLR



## Elektrisch angeregter CO<sub>2</sub>-Laser

### Anregungsschema

Vibrationsanregung durch Elektronenstoß,  
DC-Entladung; RF-Entladung

Energietransfer N<sub>2</sub> ⇌ CO<sub>2</sub>

Laseremission 10,6 µm und 9,6 µm

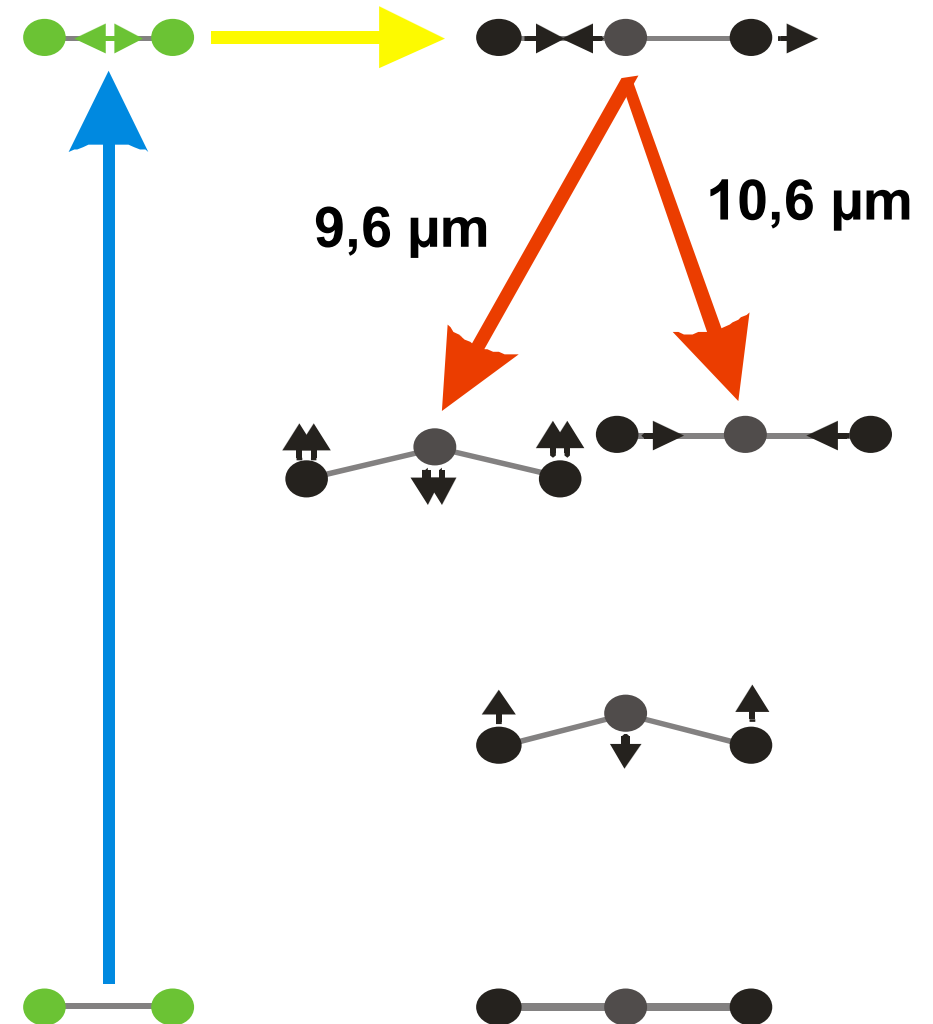
Strahlungslose Relaxation in den  
Grundzustand ⇌ Wärme

Vorteil von Gasen:

homogenes Brechungsindexprofil

Kühlung, z.B durch Gaskreislauf

oder Beimischung von Helium möglich



# Natürlicher CO<sub>2</sub>-Laser

## Emittierte Laserleistung

( $\lambda = 9,4 \mu\text{m}$  und  $\lambda = 10,4 \mu\text{m}$  kombiniert):

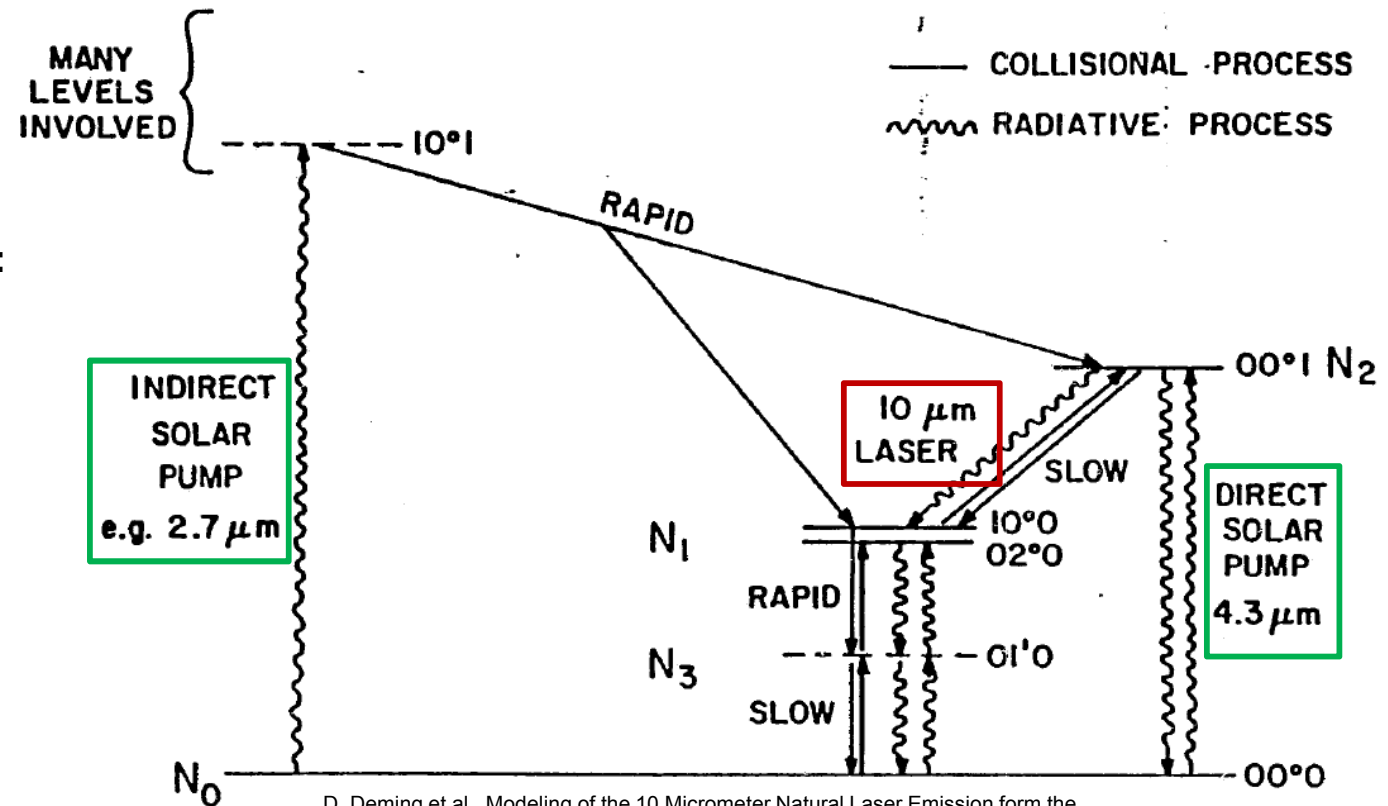
- Mars:  $P = 1,6 \mu\text{W}/\text{cm}^2$
- Venus:  $P = 5,6 \mu\text{W}/\text{cm}^2$

D. Deming et al., Observations of the 10 Micrometer Natural Laser Emission from the Mesospheres of Mars and Venus, NASA Technical Memorandum # 85044, 1983

## Maximal zulässige Bestrahlung (mittleres IR):

- Auge:  $P_{MZB} = 0,1 \text{ W}/\text{cm}^2$
- Haut:  $P_{MZB} = 0,1 \text{ W}/\text{cm}^2$

## MOLECULAR PHYSICS OF NATURAL MARTIAN LASER



D. Deming et al., Modeling of the 10 Micrometer Natural Laser Emission from the Mesospheres of Mars and Venus, NASA Technical Memorandum # 85045, 1983

## „Biolaser“

Einzelne Zelle einer Qualle  
im Resonatoraufbau

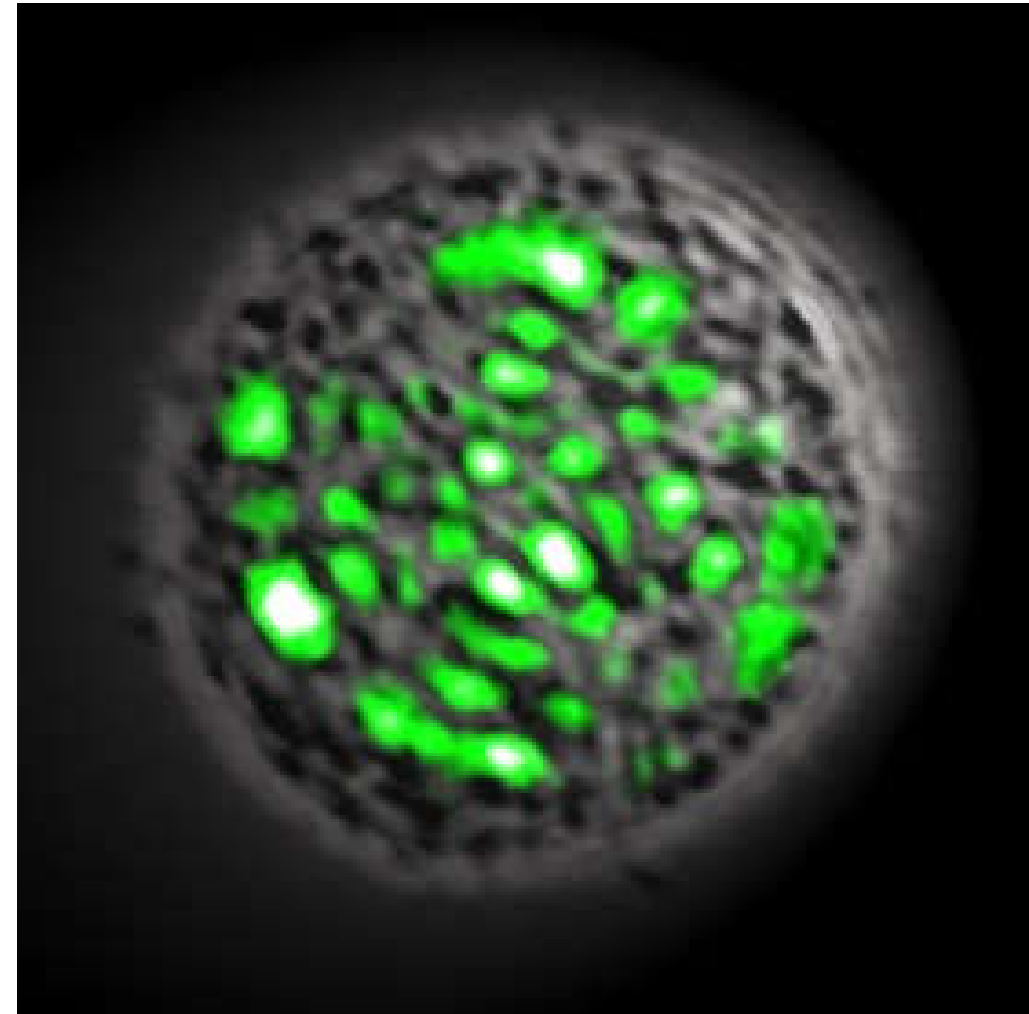
Pumpprozess:

ns/nJ Pulse (blau)

Lasermedium GFP

(green fluorescent protein),  $\lambda = 516 \text{ nm}$

Zelle lebt auch nach längerer Laseremission.



M.C. Gather et al, Single-cell biological lasers, Nature Photonics **5**, 406-410 (2011)




## Eigenschaften

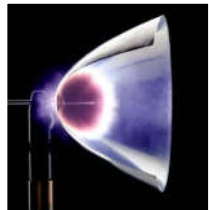
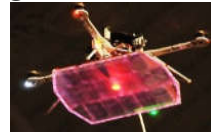
➤ Kohärentes Licht mit Gleichheit von  
 ➤ Frequenz  Spektroskopie


Bsp.: Detektion von  
 Lecks in Gasleitungen

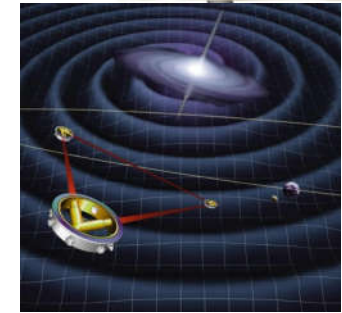
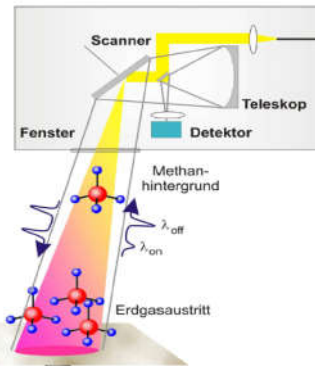
➤ Phase  Interferometrie

Bsp.: Detektion von  
 Gravitationswellen

➤ Richtung  große Reichweite, gute Fokussierbarkeit



➤ Laserpulse  hohe Intensitäten in kurzen Zeitskalen ( $\mu\text{s}$  – fs)  
 Kurzzeitdynamik



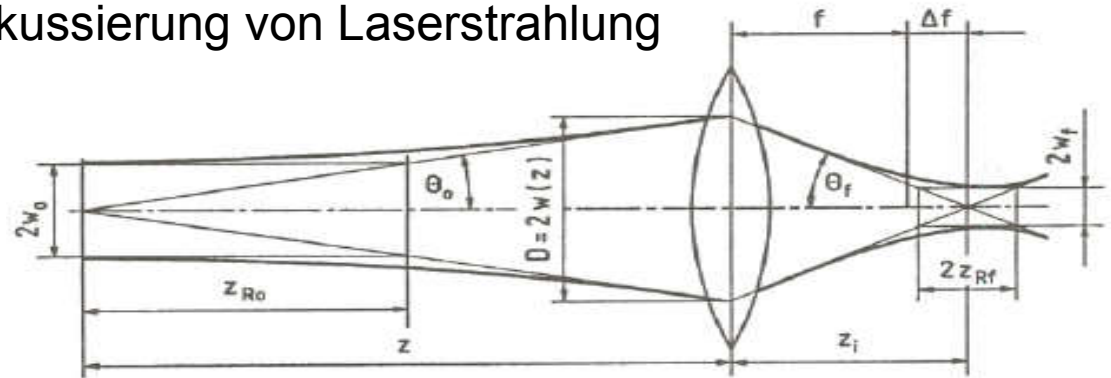
## Fokussierbarkeit

### Fokussierung von Sonnenlicht



Untergang der Römischen Flotte,  
Hitzestrahl des Archimedes,  
Syracus, 212 v. Chr.

### Fokussierung von Laserstrahlung



H. Hügel, Strahlwerkzeug Laser, Teubner-Verlag 1992, Stuttgart

### Strahlparameterprodukt

$$w_0 \Theta_0 = w_f \Theta_f = \frac{\lambda \cdot M^2}{\pi}$$

- $w$  Strahltaile
- $\Theta$  Divergenzwinkel
- $M^2$  Strahlqualitätsparameter
- konstant bei Durchgang durch optische Elemente
- idealer Gaußstrahl:  $M^2 = 1$
- sehr hohe Intensitäten möglich

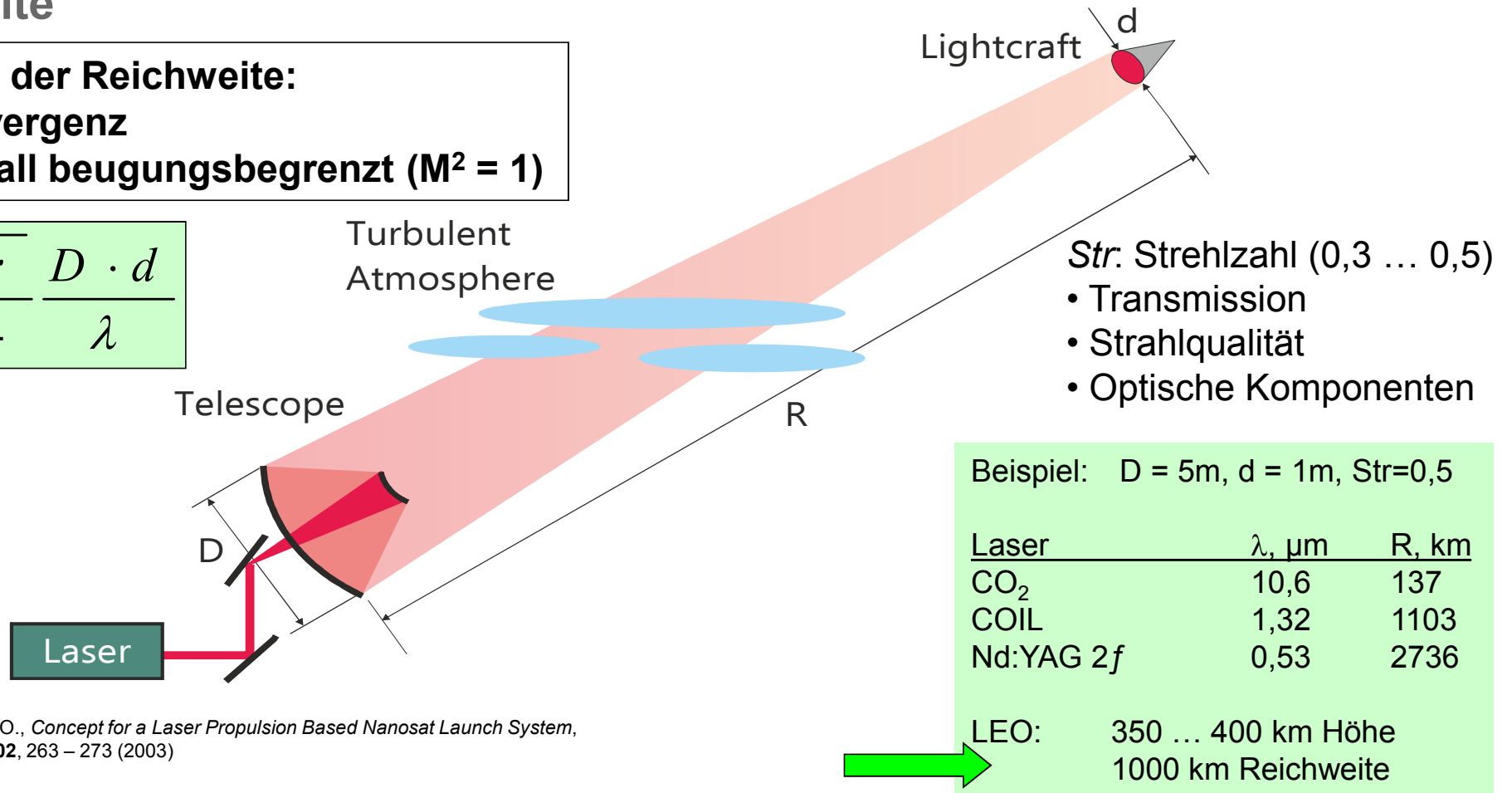


## Reichweite

### Begrenzung der Reichweite:

- Strahldivergenz
- im Idealfall beugungsbegrenzt ( $M^2 = 1$ )

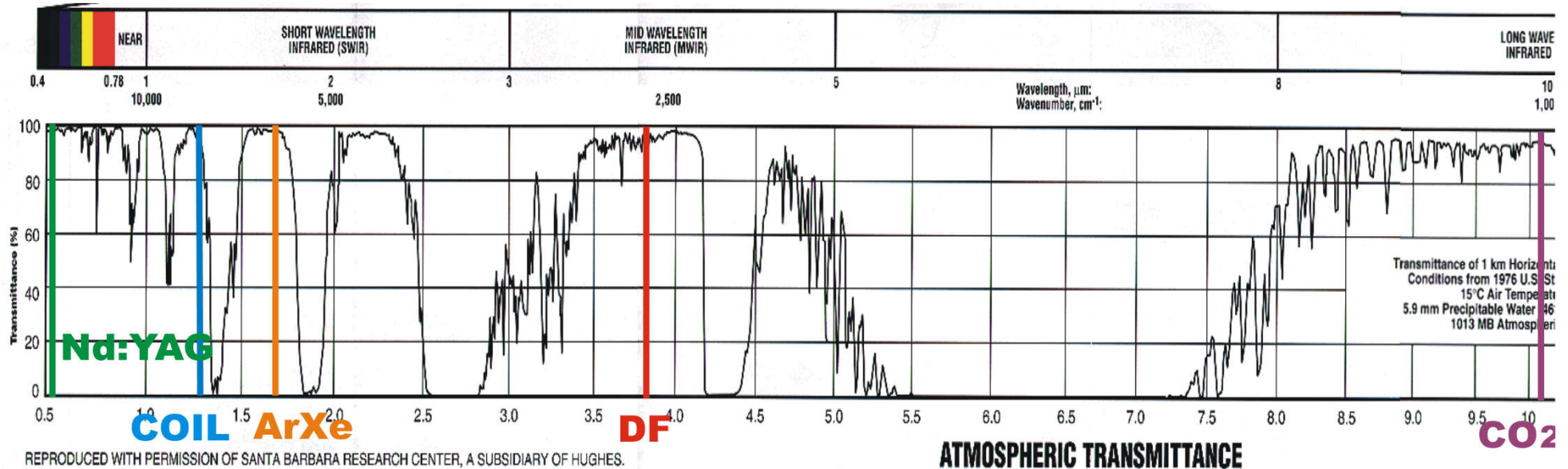
$$R = \frac{\sqrt{Str}}{2,44} \frac{D \cdot d}{\lambda}$$



Eckel, H.-A. and Schall, W. O., *Concept for a Laser Propulsion Based Nanosat Launch System*, ISBEP 2, AIP Conf. Proc. **702**, 263 – 273 (2003)



## Atmosphärische Transmission



- Streuung an Partikeln – wetterabhängig, größenabhängig
- Turbulenz
  - Strahlwanderung / -aufweitung
  - Modifikation der Fokussierung
    - insbesondere bei Erhitzung durch Absorption an Partikeln (Thermal Blooming)



# Inhalt

## 1 Einleitung

## 2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Beispiele
- > 2.3 Ausbreitung von Laserstrahlung

## 3 Antriebskonzepte

### > 3.1 Überblick

- > Systematik und Kenngrößen
- > Photonenantrieb
- > Photovoltaische Laserantriebe
- > Thermische Laserantriebe
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > 3.3 Laser Lightcraft

## 4 Zusammenfassung

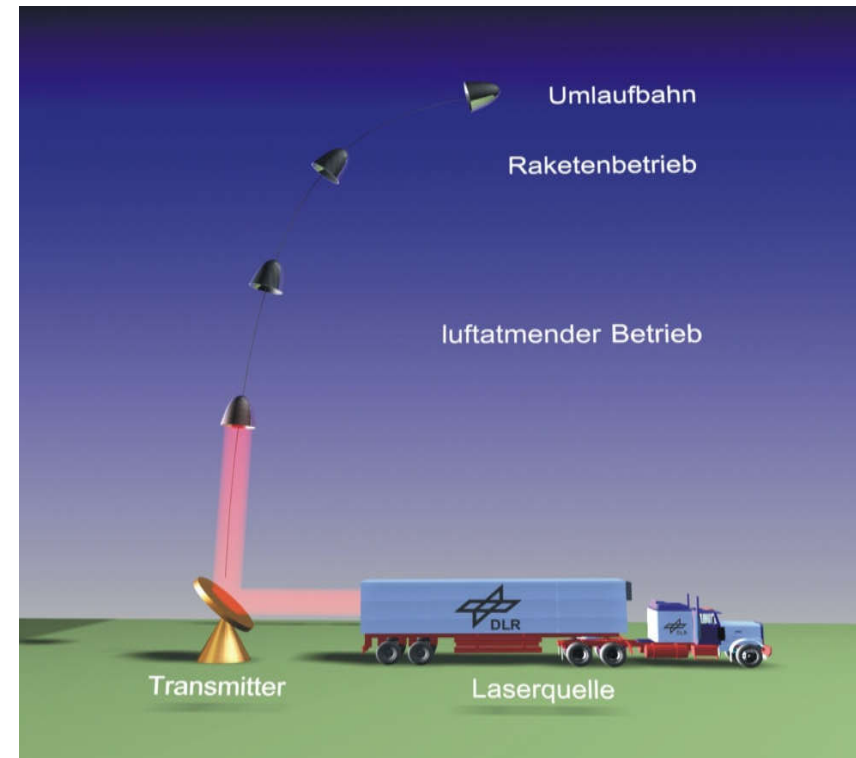




# Antriebskonzepte

## Arten der Wechselwirkung

- Reflektion – **Photonenantrieb**
- Absorption  
– **Photovoltaische Laserantriebe**
- Erwärmung, Ionisierung  
– **Thermische Laserantriebe**
  - Materialabtrag  
– **Ablative Laserantriebe**
  - Detonation und Verbrennung  
– **Laser Lightcraft**



## Laserbasierter Raketenantrieb



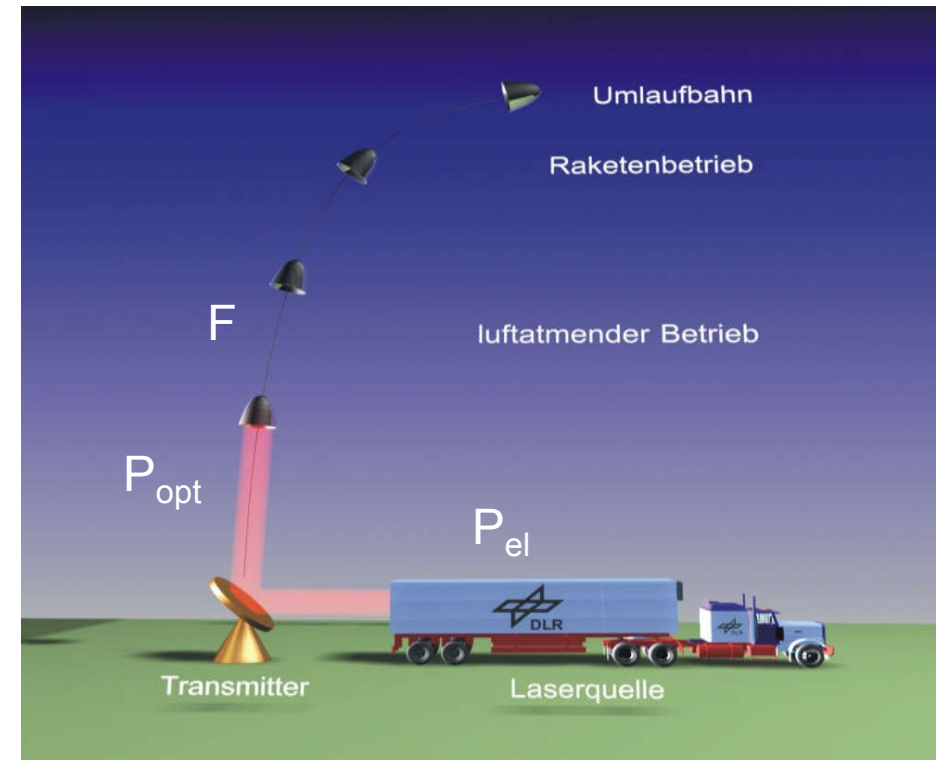
## Schub-/Leistungsverhältnis

Impulskoppelkoeffizient (Antrieb):

$$c_m = \frac{F}{P_{opt}} = \frac{\Delta p}{E_L}$$

Impulskoppelkoeffizient (System)

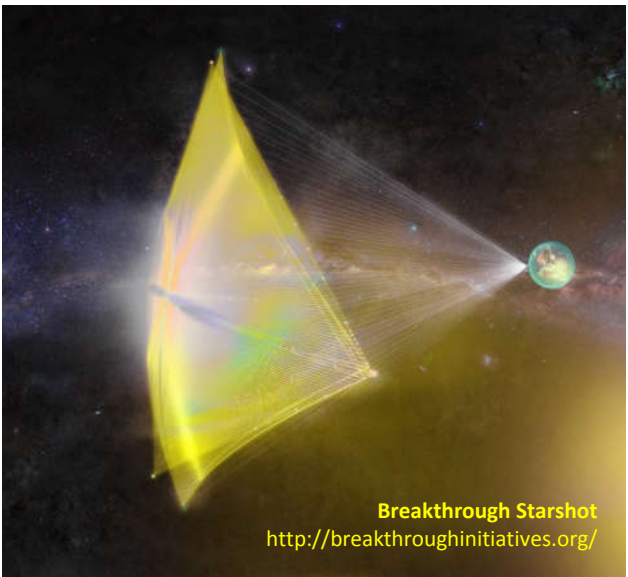
$$c_{m,sys} = \frac{F}{P_{el}} = \eta_{el-opt} \cdot c_m$$



**Laserbasierter Raketenantrieb**



# Konzept für interstellare Missionen

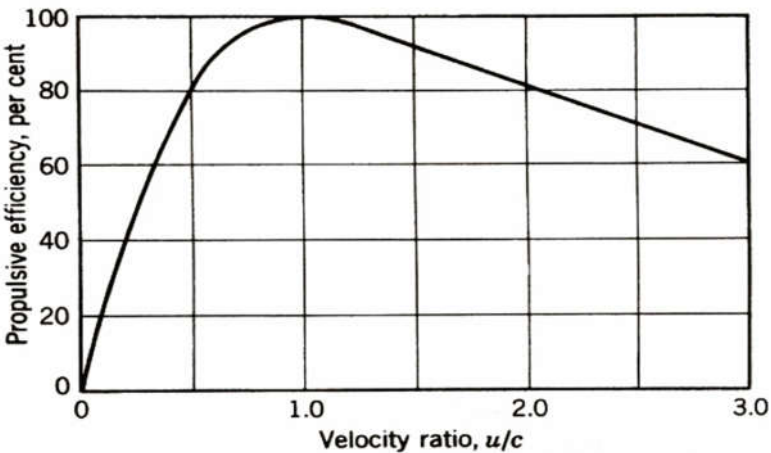


- minimaler Impulsübertrag (→ Mikroantriebe)

$$c_m = \frac{2 p_{Photon}}{E_{Photon}} = \frac{2 h \nu \cdot c^{-1}}{h \nu} = \frac{2}{c} = 6.7 \text{ nN} / W$$

- hohe Effizienz bei relativistischen Geschwindigkeiten
- Beispiel:  $v=c/4$   $(v_{jet} = c)$

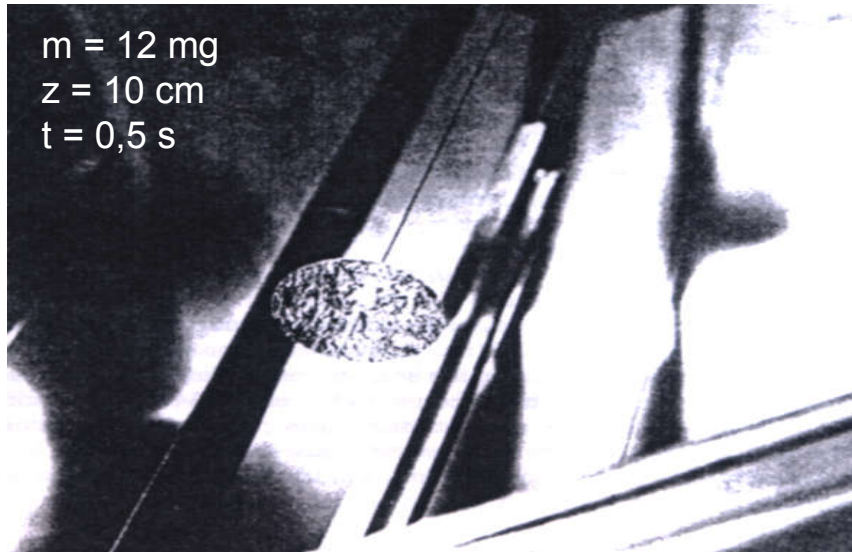
$$\eta_{prop} = \frac{2 v / v_{jet}}{1 + (v / v_{jet})^2} = \begin{cases} 47 \% \\ 0,03 \% \end{cases} \quad (v_{jet} = 5 \text{ km} / \text{s})$$



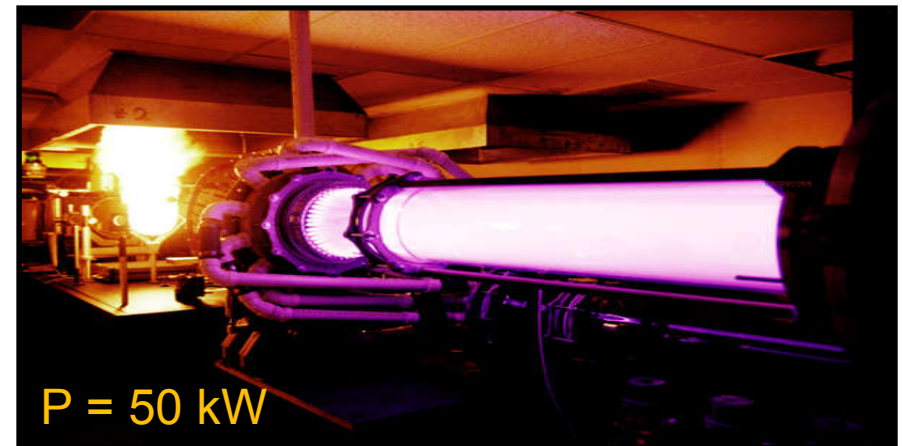
G.P. Sutton et al, Rocket Propulsion Elements (2001)



## Lasersegel am Hochenergielaser



Myrabo et al, Laser-boosted light sail experiments with the 150-kW-LHMEL II CO<sub>2</sub> laser,  
Proc. SPIE **4760**, 774-798, (2002)

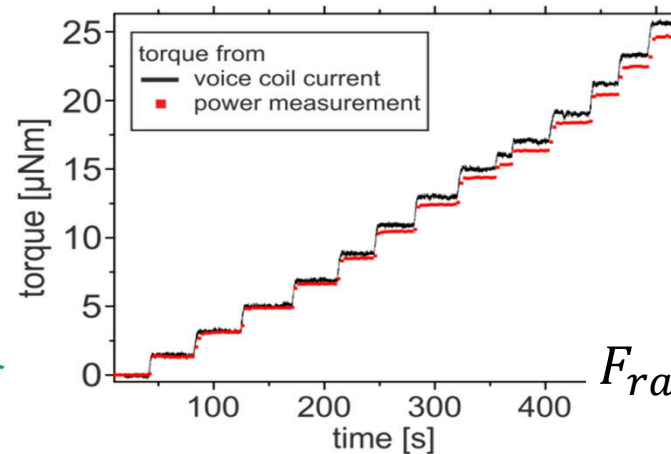
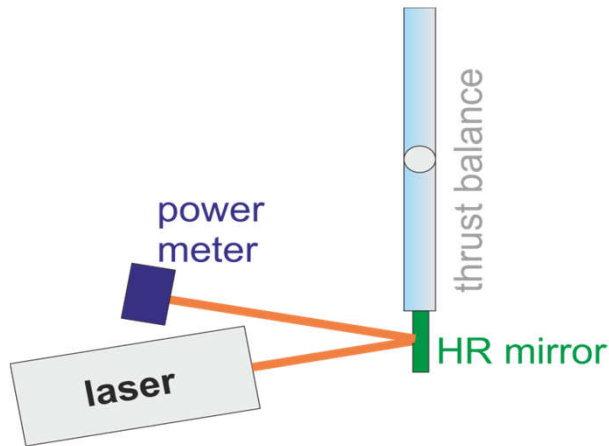


CO<sub>2</sub>-Laser (cw)  
Laser Hardened Materials Evaluation Laboratory  
Wright Patterson Air Force Base



## Exkurs: Kalibration durch Photonendruck

Extra-cavity



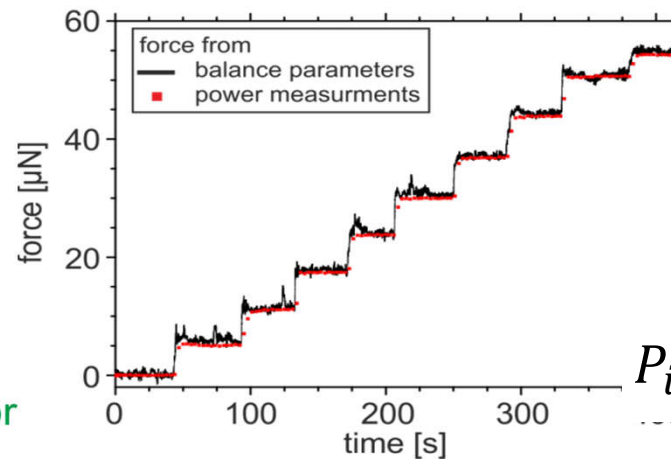
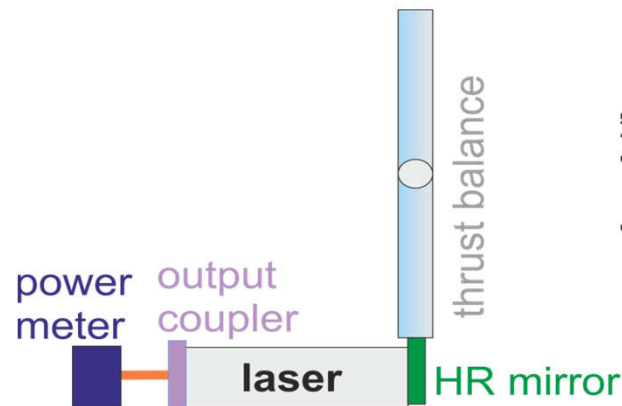
Laser: 1 kW Scheibenlaser

HR: Hochreflektierender  
Spiegel,  $R = 99.98\%$

Einfallswinkel  $\vartheta = 10^\circ$

$$F_{\text{radiation}} = (1 + R) \cdot \frac{P_{\text{ext}}}{c} \cdot \cos(\vartheta)$$

intra-cavity



HR-Spiegel = Endspiegel  
der Laserkavität

Auskoppelspiegel:  $T = 2.4\%$

$\vartheta = 0^\circ$

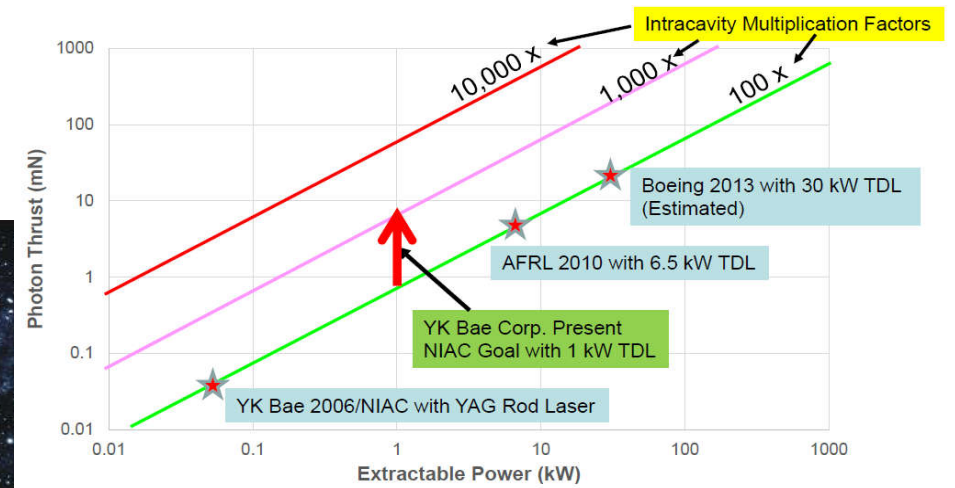
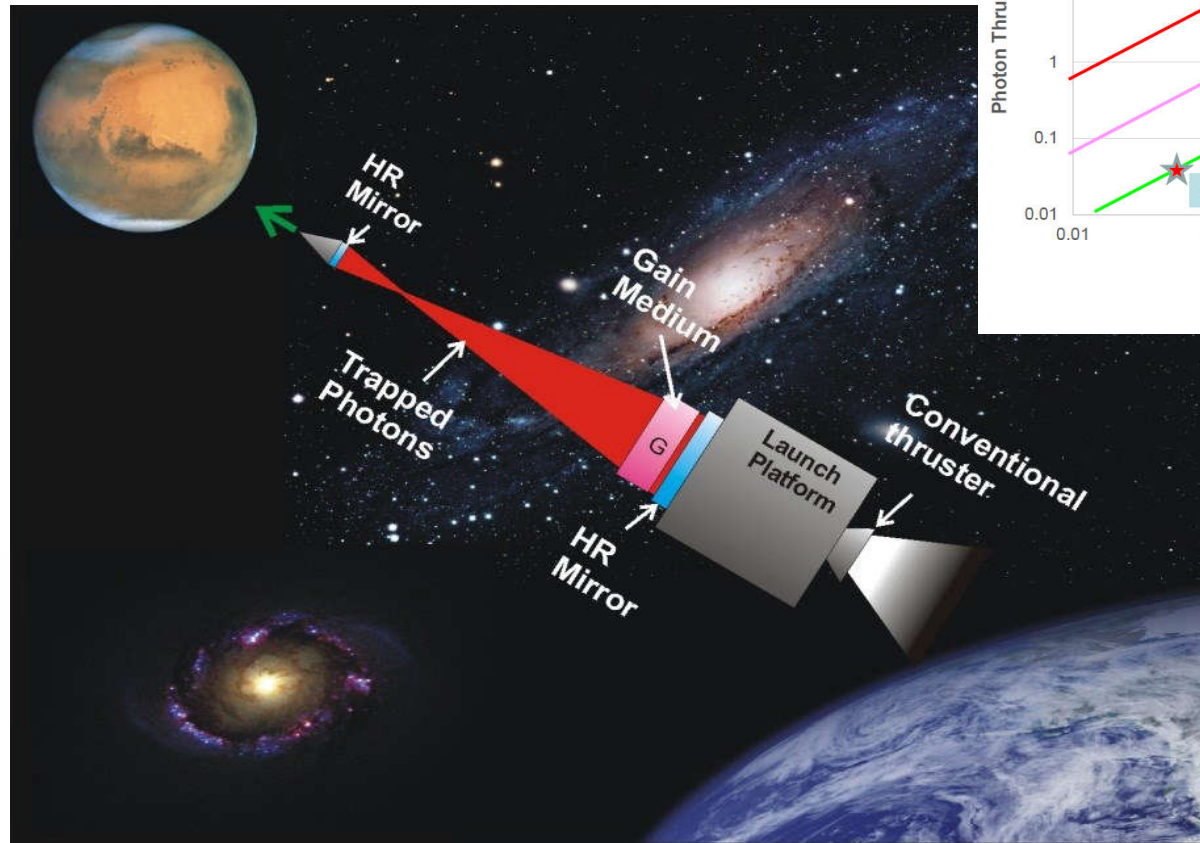
$$P_{\text{int}} = P_{\text{ext}} \frac{1 - T}{T} \approx 41 \cdot P_{\text{ext}}$$

S. Karg et al., Laser Propulsion Research Facilities at DLR Stuttgart,  
Proceedings of HPLA/BEP 2014





## Photonenantrieb – intra-cavity

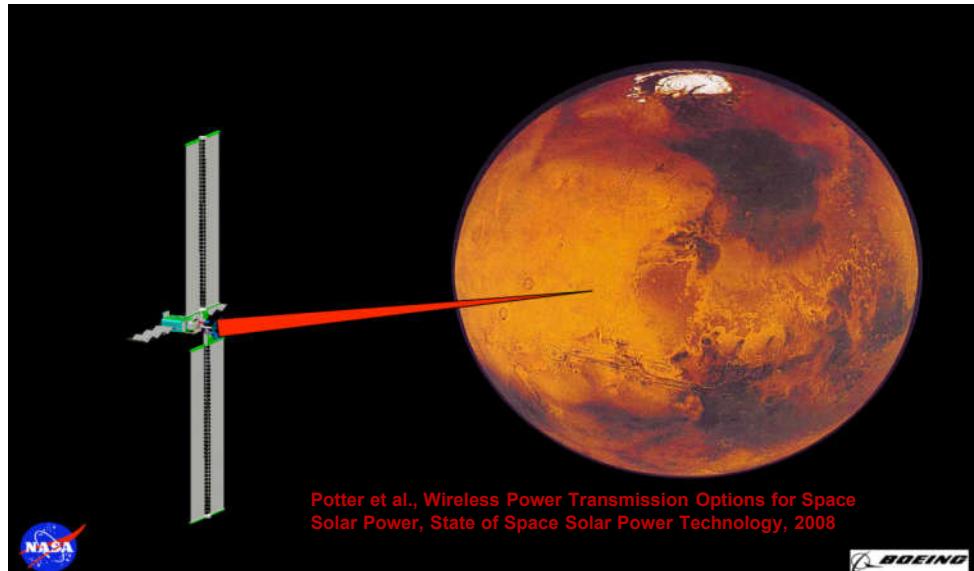
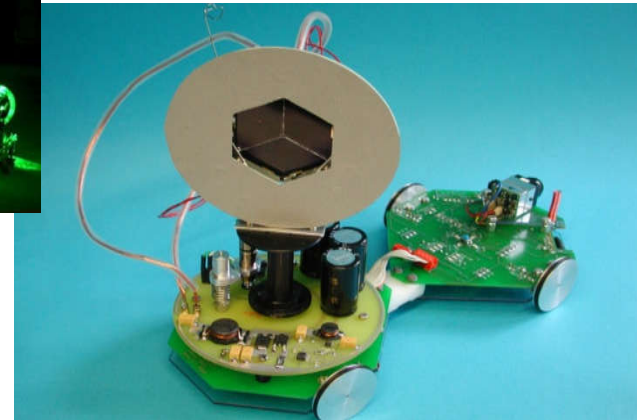


TDL: Thin Disk Laser

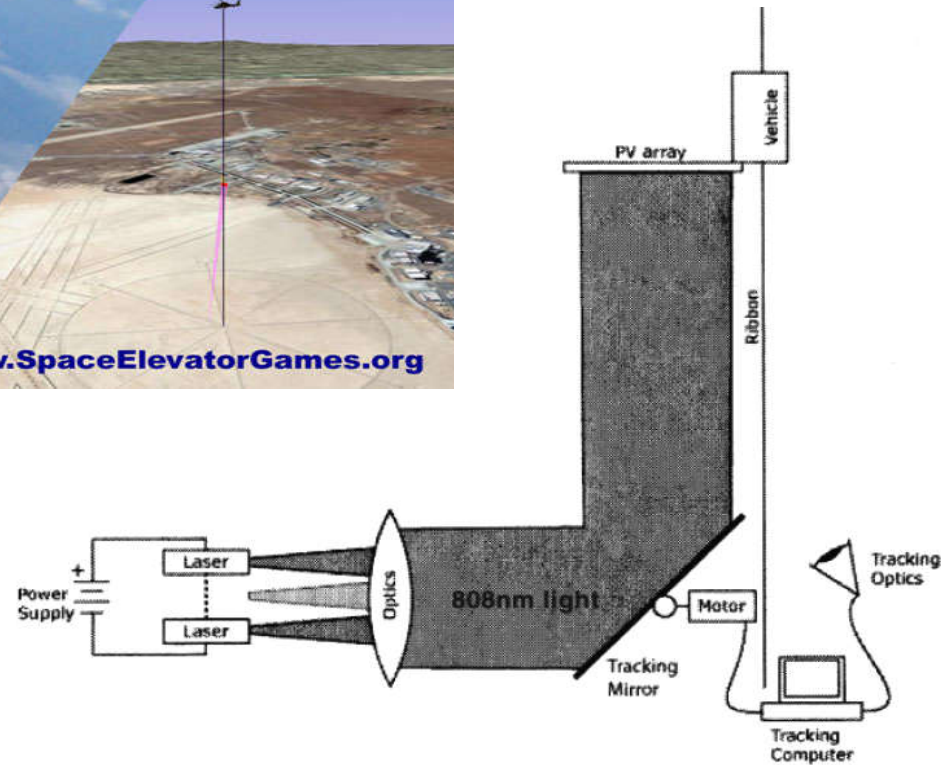
Y.K.Bae, The Past, Present and Future of Photon Propulsion, Proceedings of HPLA/BEP 2014



## Energieversorgung im Planetenschatten



# Space Elevator

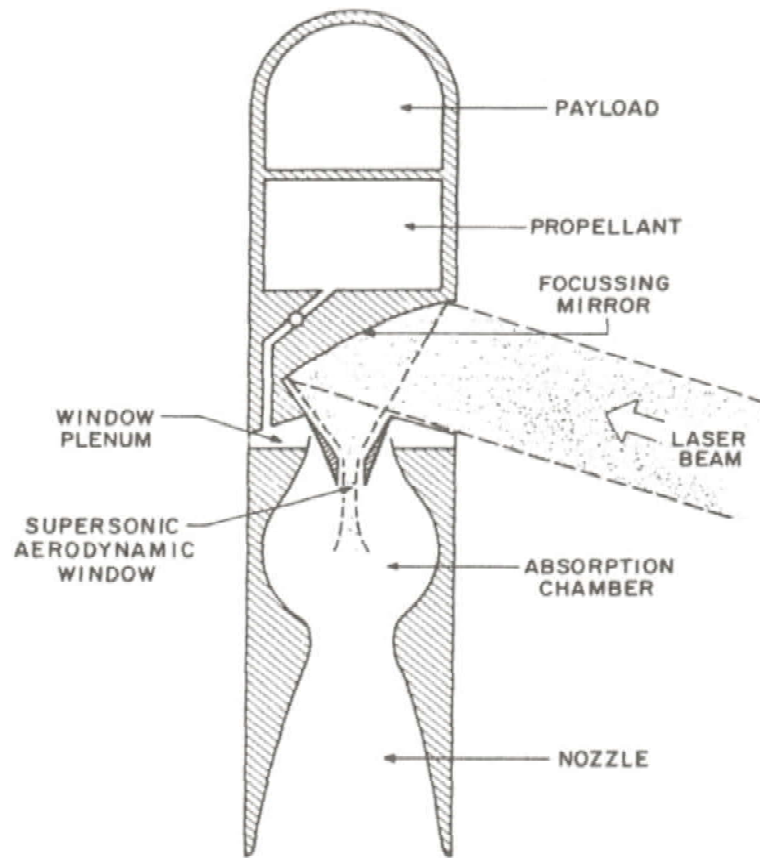


J.T. Kare et al, Laser Power Beaming on a Shoestring, AIP Conf. Proc. **997**, 97-108 (2008)

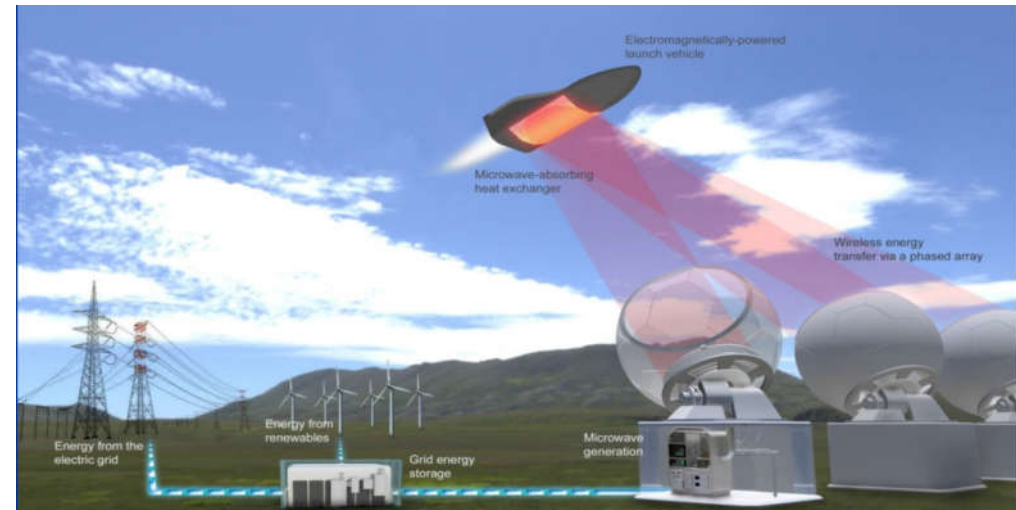
B.C. Edwards, The Space Elevator: an Ideal Application for the Free Electron Laser, Proc. SPIE **4632**, 134-140 (2002)



## Thermische Laserantriebe



R.F. Weiss et al., Laser Propulsion, Astronautics and Aeronautics, March 1979: 50 – 58



J. Coopersmith et al., A Strategic Roadmap for Commercializing Low-Cost Beamed Energy Propulsion Launch Systems, AIAA Space 2016

### Funktionsprinzip:

- Aufheizen eines Treibstoffes durch fokussierten Laserstrahl
- Schub durch Expansion

Laserquelle: cw oder gepulst



# Inhalt

## 1 Einleitung

## 2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Ausbreitung von Laserstrahlung

## 3 Antriebskonzepte

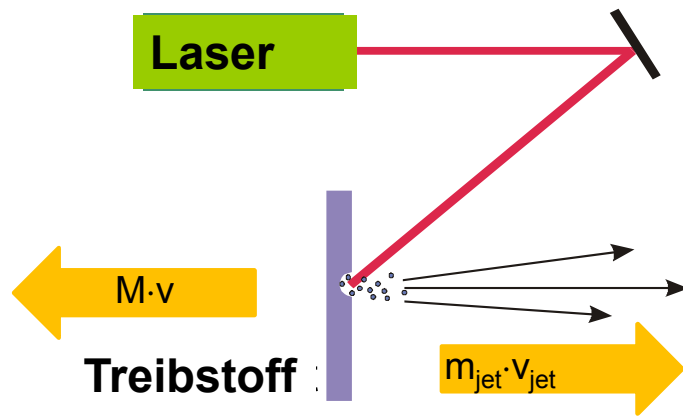
- > 3.1 Überblick
- > **3.2 Ablative Laserantriebe**
  - > 3.2.1 Antriebsprozess
  - > 3.2.2 Mikroantriebe USA
  - > 3.2.3 Mikroantrieb DLR
  - > 3.2.4 Hybride laser-el. Antriebe
  - > 3.2.5 Beseitigung von Weltraummüll
- > 3.3 Laser Lightcraft

## 4 Zusammenfassung



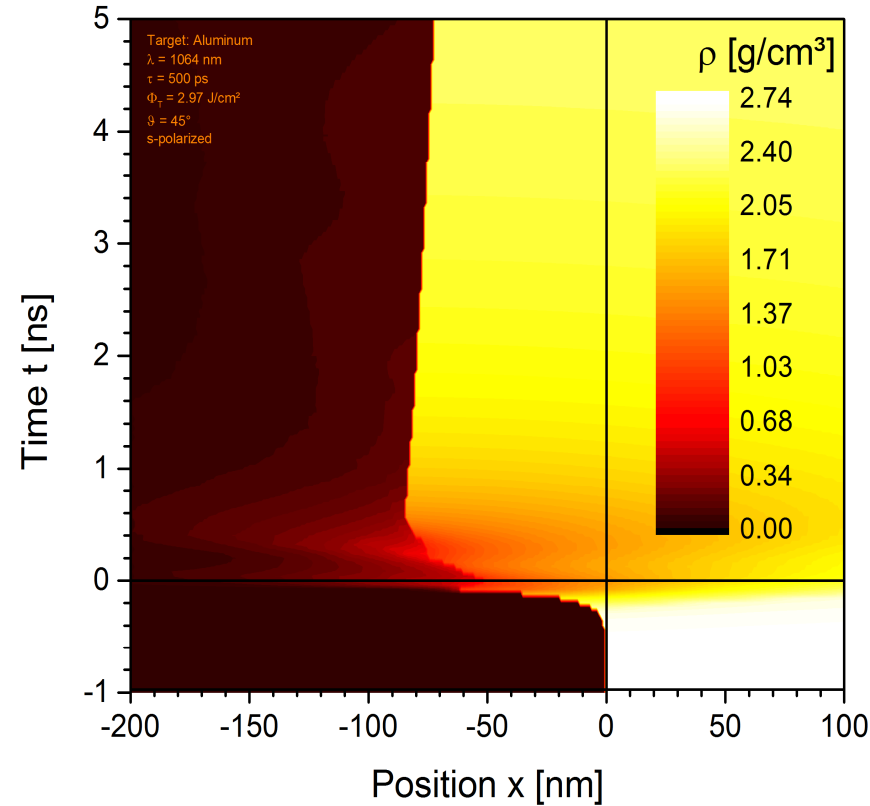


## Laserinduzierter Ablationsprozess

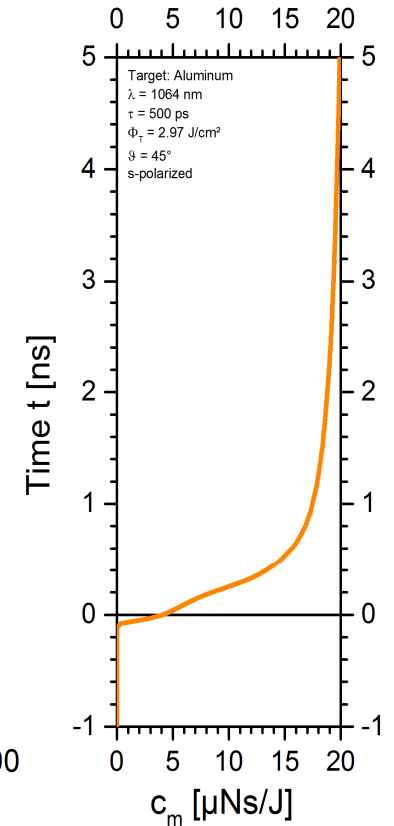


### Laser Ablation

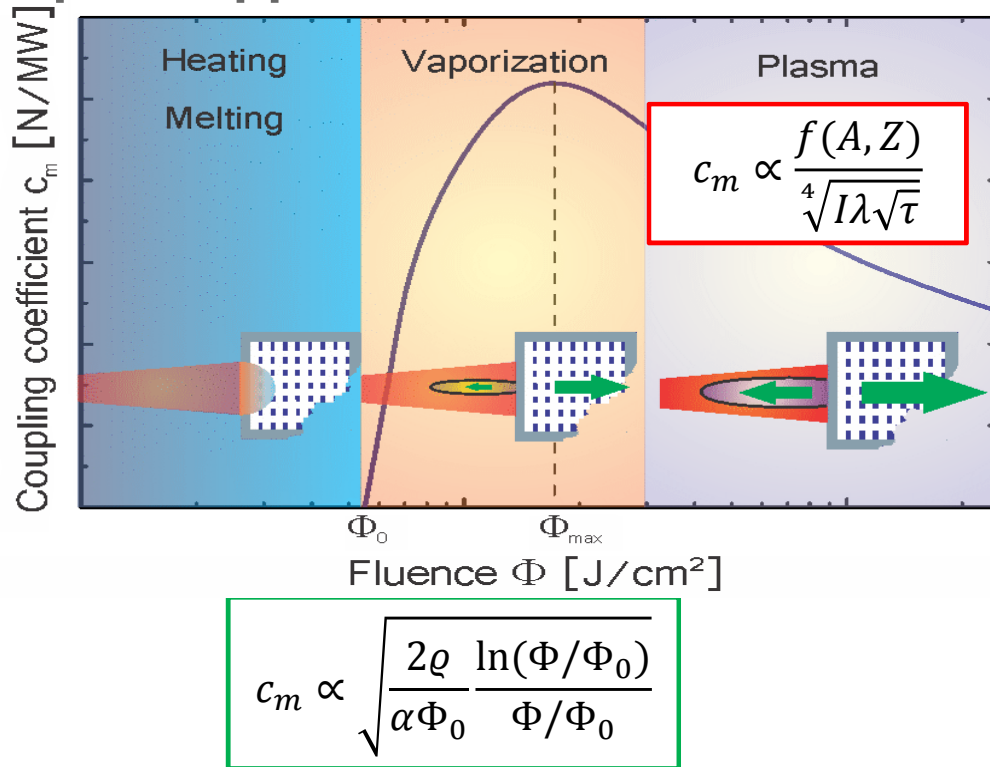
- Schmelzprozesse
- Verdampfung
- Ionisierung
- Plasmabildung
- Thermische Expansion
- Impulsübertrag



Hydrodynamische Simulationen mit Polly-2T (JIHT-RAS)

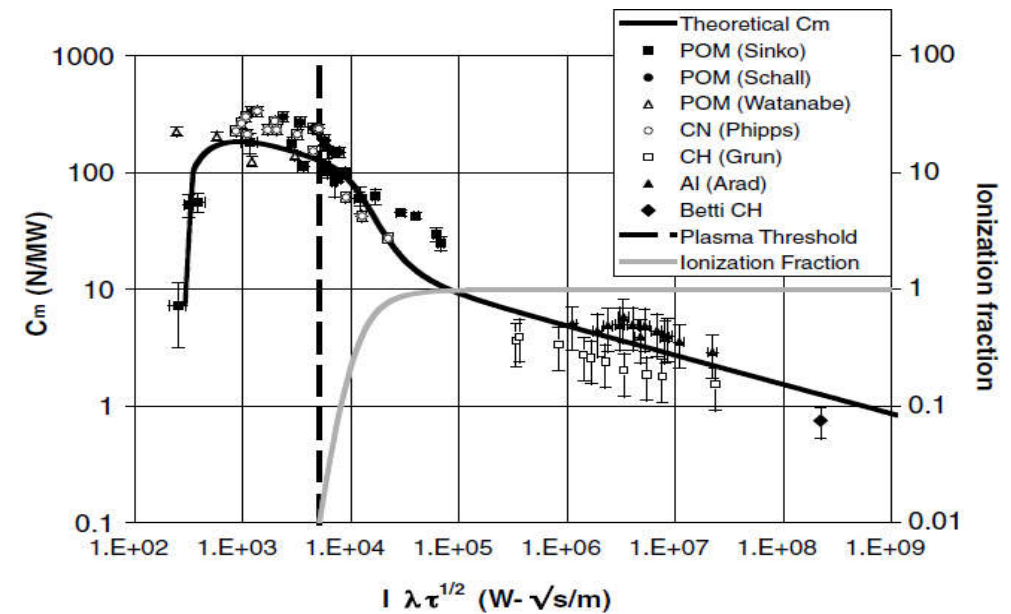


# Impulskoppelkoeffizient



gültig für  $\tau > 10 \dots 100 \text{ ps}$

B. Esmiller: Cleanspace – Space debris removal by ground based laser, HPLA/BEP 2014

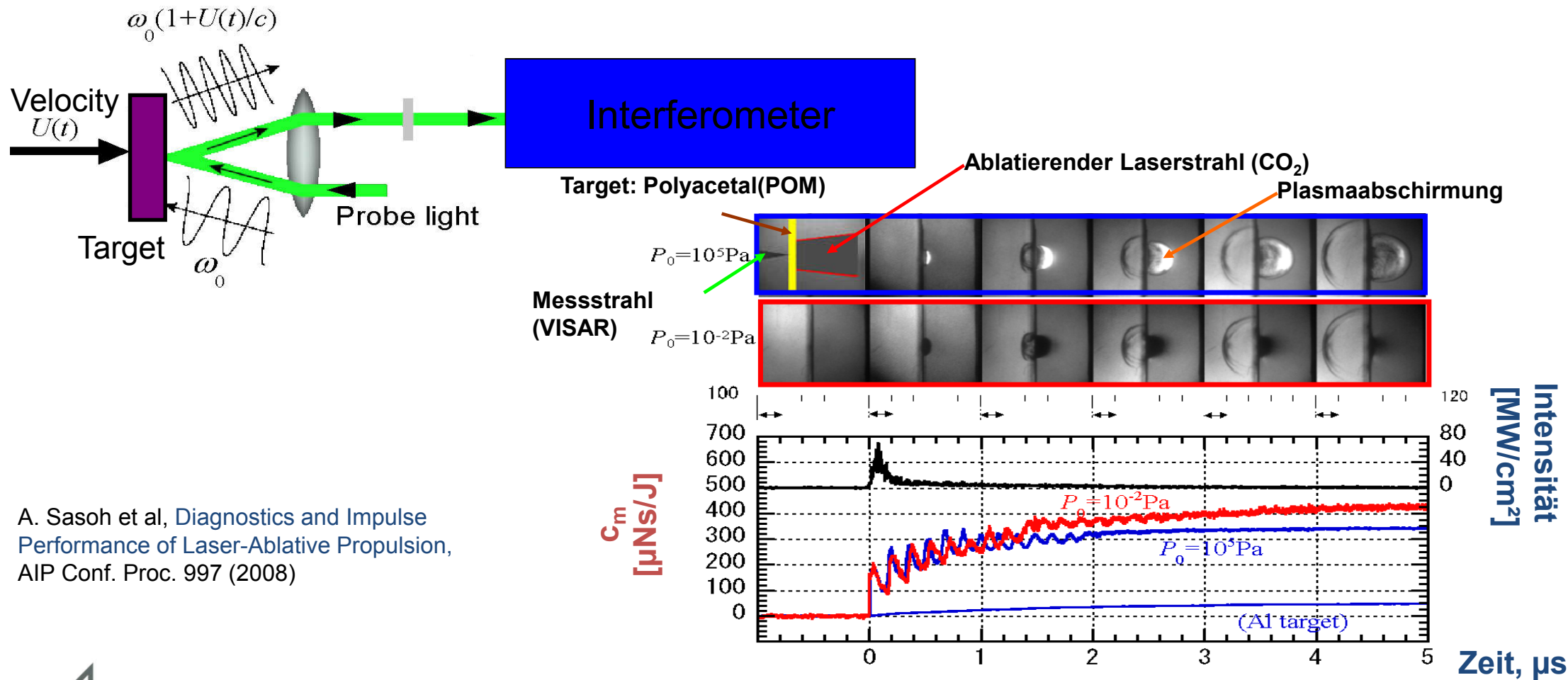


Phipps et al, Review: Laser-Ablation Propulsion, J. Prop. Pow. **26(4)**, 609-637 (2010)





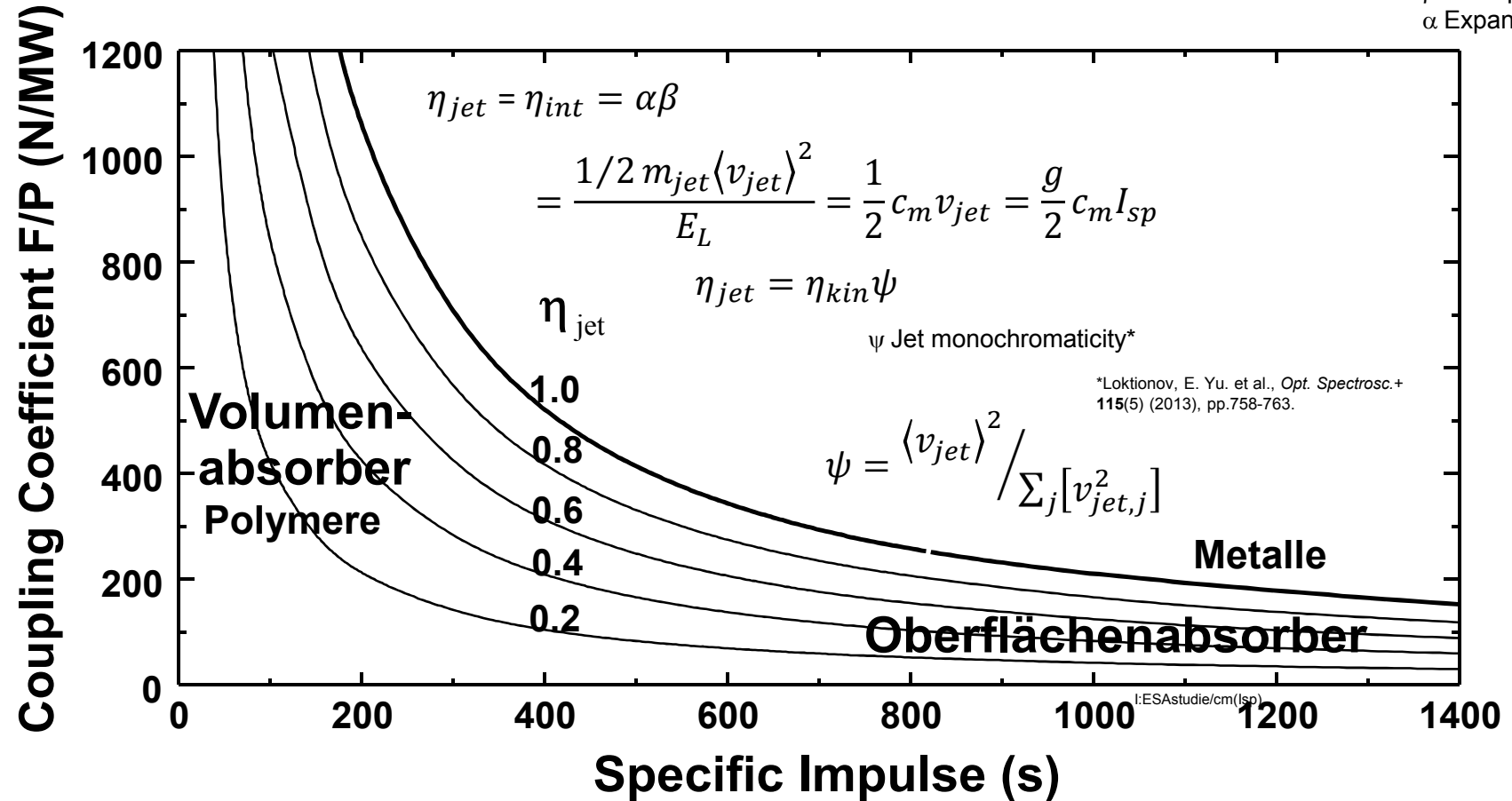
## Impulsmessung



A. Sasoh et al, *Diagnostics and Impulse Performance of Laser-Ablative Propulsion*, AIP Conf. Proc. 997 (2008)

## Innere Antriebseffizienz (Treibstoff-/Jeteffizienz)

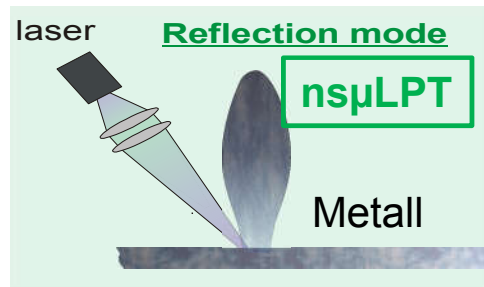
$\beta$  Absorptionseffizienz  
 $\alpha$  Expansionseffizienz



Eckel, H.-A. and Schall, W. O., *Concept for a Laser Propulsion Based Nanosat Launch System*, ISBEP 2, AIP Conf. Proc. **702**, 263 – 273 (2003)



## Konzepte



Antrieb

Masse  
[kg]Min.Impulsbit  
[μNs] $I_{sp}$   
[s] $C_{m,sys}$   
[μN/W<sub>el</sub>]T  
[μN]

nsμLPT

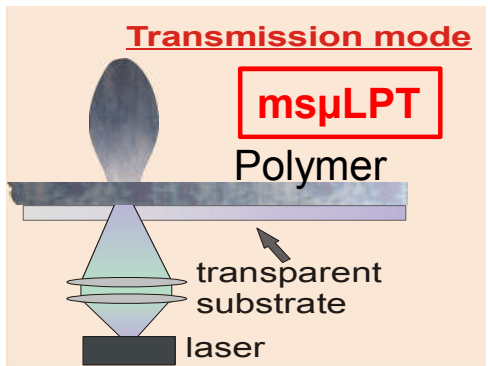
0,8

 $4 \cdot 10^{-5}$ 

3000

40

100



msμLPT

0,5

0,05

250

550

10000

Vergleich:

μPPT

1,0

2

1000

20

30

FEPP

8,7

1

9000

15

1400

Phipps et al, Performance Test Results for the Laser-Powered Microthruster, AIP Conf. Proc. **830**, 224-234 (2006)



## T-Mode Micro Laser Plasma Thruster (ms $\mu$ LPT)

Getestete Treibstoffe:

PVC, sowie exotherme  
Polymere (C-dotiert)

$T$  0,14 ... 0,29 mN (PVC:C)  
2,8 ... 7,2 mN (EP:C I)

$c_m$  60 ... 120  $\mu\text{N/W}$  (PVC:C)  
1170 ... 3000  $\mu\text{N/W}$  (EP:C)

$I_{sp}$  650 ... 750 s (PVC:C)  
160 ... 540 s (EP:C)

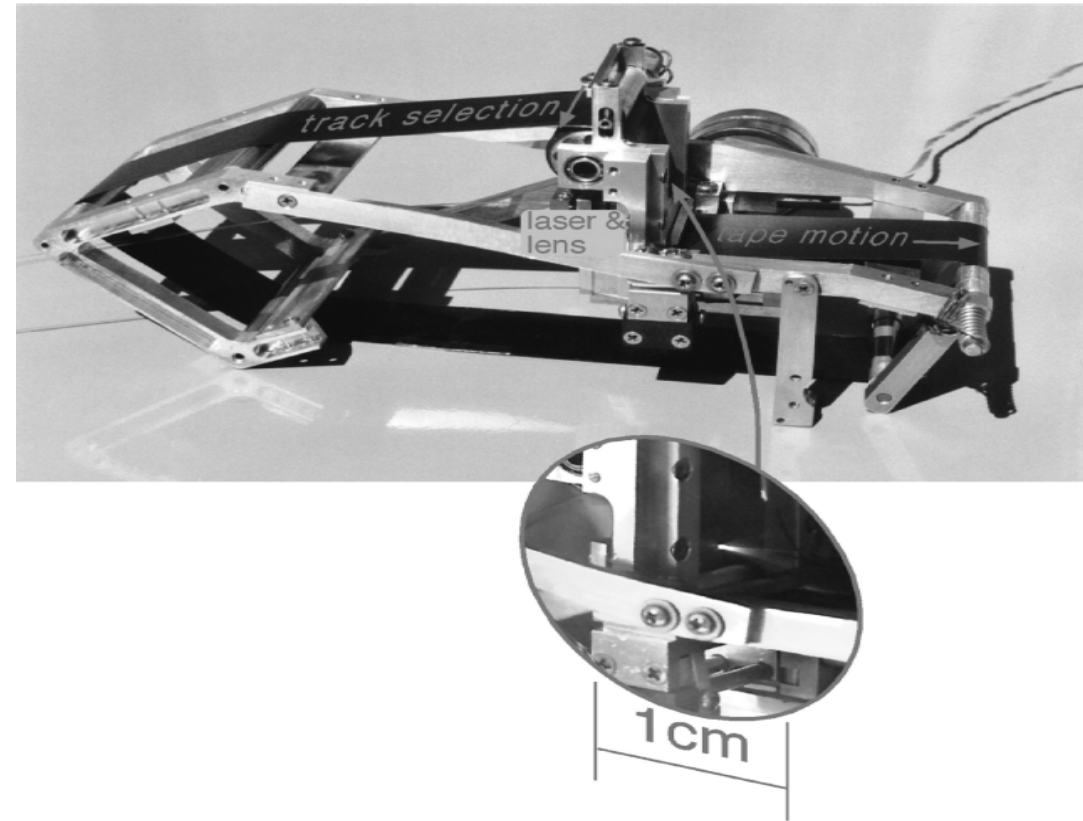
Lasertyp: Diodenlaser

$\tau$  2 ms

$\lambda$  920 nm

$f_{rep}$  80 Hz

$E_L$  30 mJ



Phipps et al, Micropropulsion using a Laser Ablation Jet, J. Prop. Pow. **20**(6), 1000-1011 (2004)  
Phipps et al, Performance Test Results for the Laser-Powered Microthruster, AIP Conf. Proc. **830**, 224-234 (2006)



## R-Mode Micro Laser Plasma Thruster (nsμLPT)

Getestete Treibstoffe:

Aluminium, Gold

$T$  0,47 ... 0,63  $\mu\text{N}$  (Au)  
0,94 ... 1,88  $\mu\text{N}$  (Al)

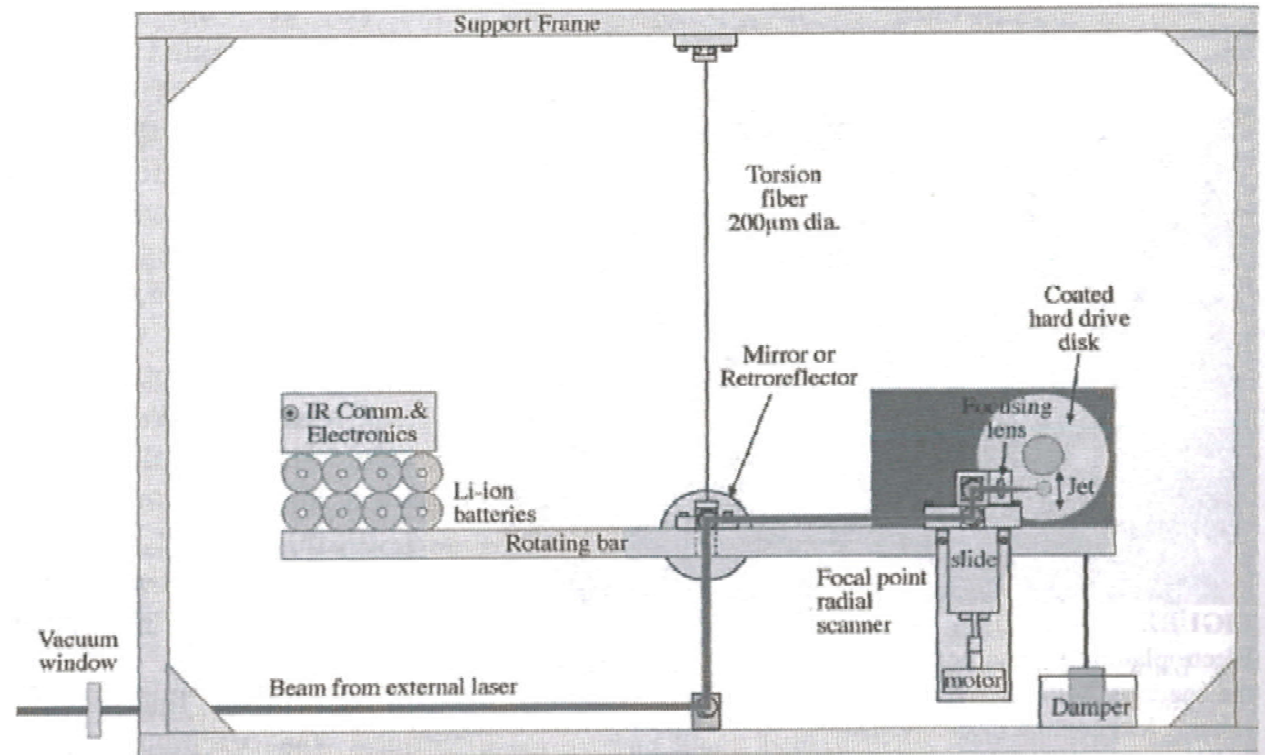
$c_m$  7,2 ... 68  $\mu\text{N/W}$  (Au)  
32 ... 111  $\mu\text{N/W}$  (Al)

$I_{sp}$  3664 ... 7905 s (Au)  
822 ... 6610 s (Al)

Lasertyp:

Diodengepumpter Nd:YAG-Laser

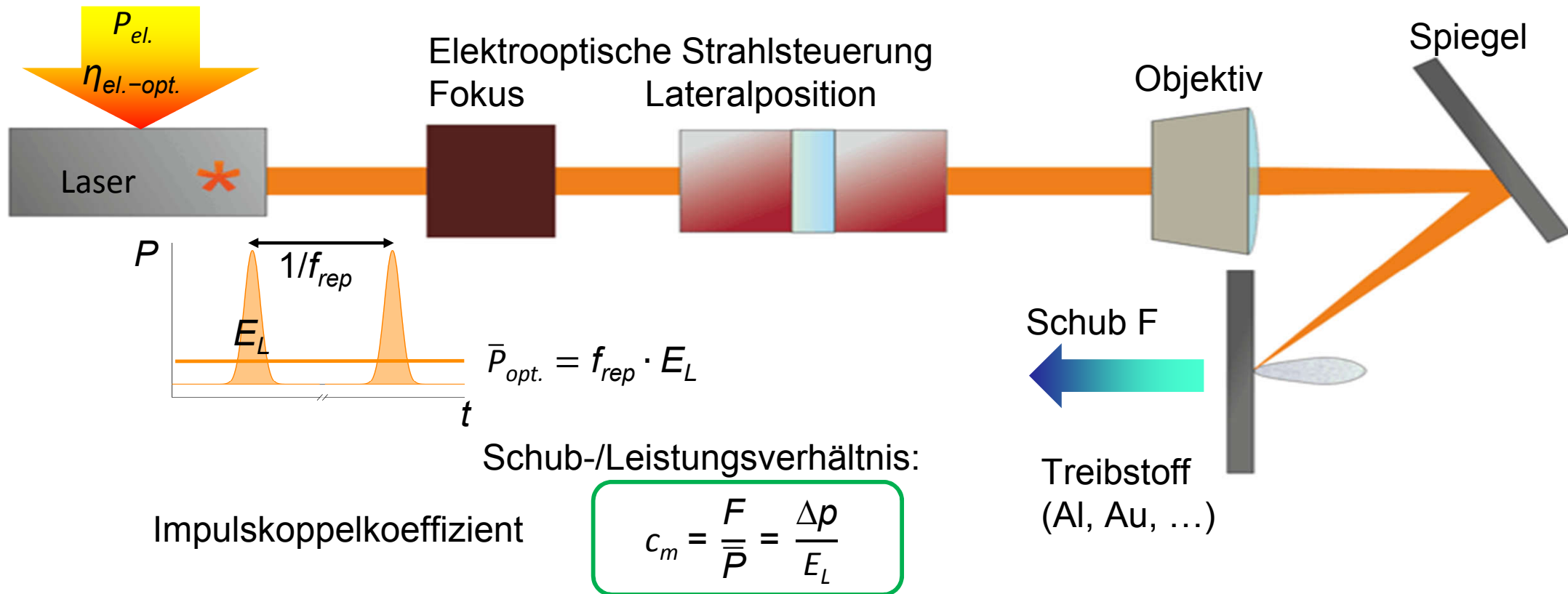
$\tau$  5 ns  
 $\lambda$  1064 nm  
 $f_{rep}$  10 Hz  
 $E_L$  1 ... 20 mJ



Phipps et al, A ns-Pulse Laser Microthruster,  
AIP Conf. Proc. **830**, 235-246 (2006)



## Trägheitsfreies Antriebskonzept



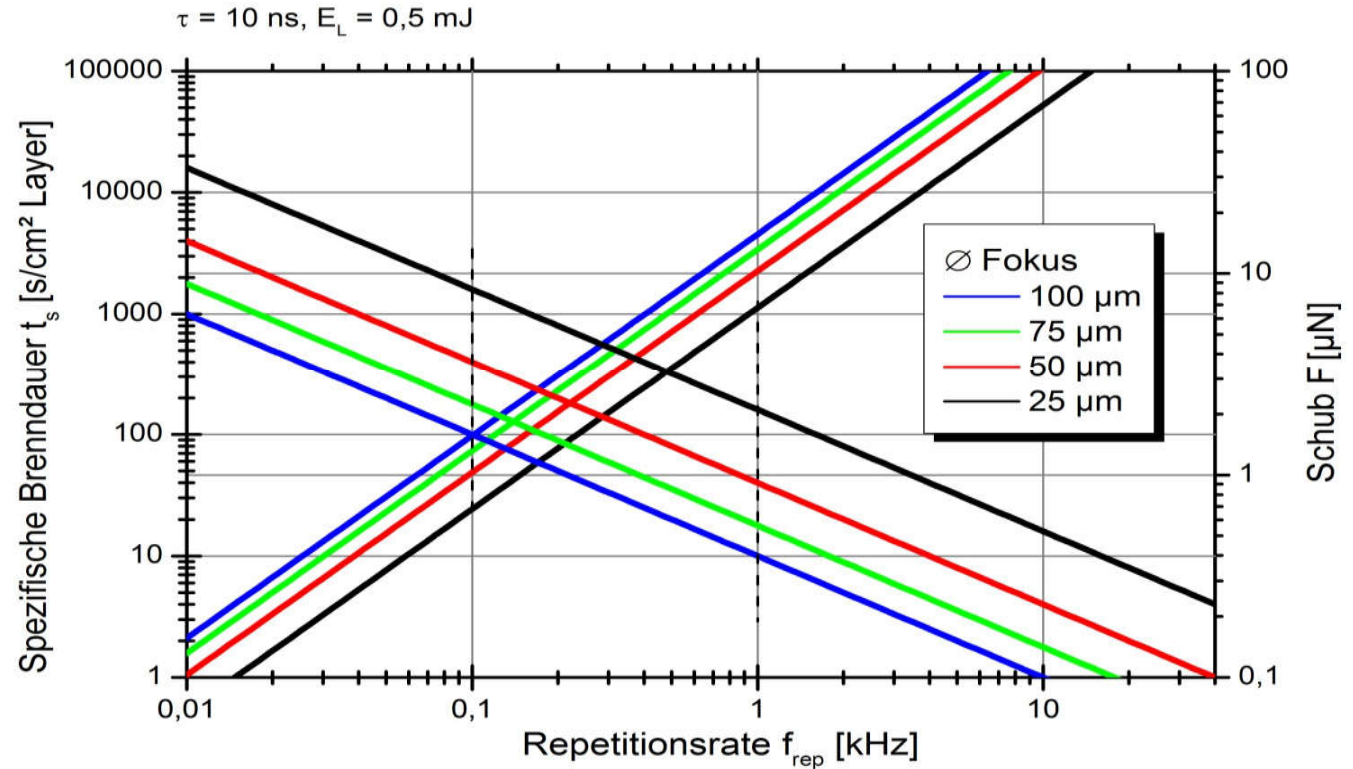
Eckel et al, *Tailoring Laser Propulsion for Future Applications in Space*,  
High Power Laser Ablation 2010, AIP Conf. Proc. **1278**, 677-688 (2010)



## Schubcharakteristik



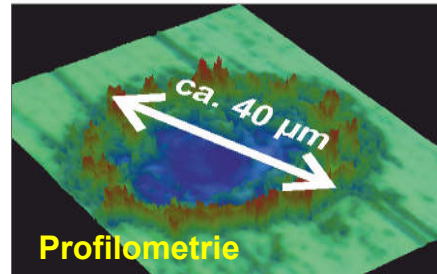
Stablaser  
 $\bar{P}_{max} = 35 \text{ W}$



Modellrechnung mit experimentellen Werten aus  
 Phipps et al, Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF, and CO<sub>2</sub> single-pulse lasers, J.  
 Appl. Phys. 64(3), 1083-1096 (1988)

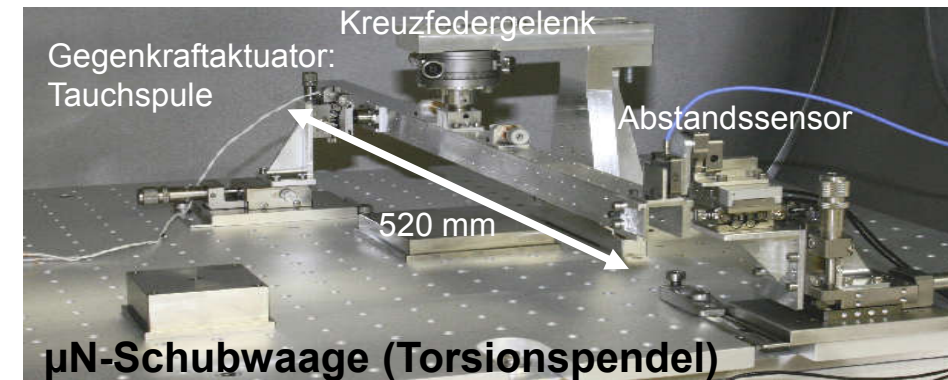
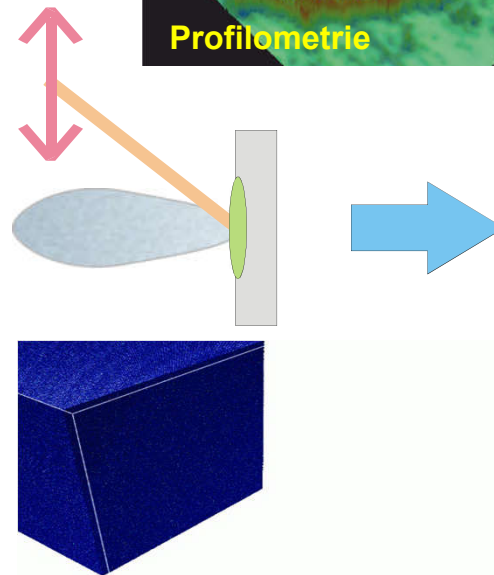
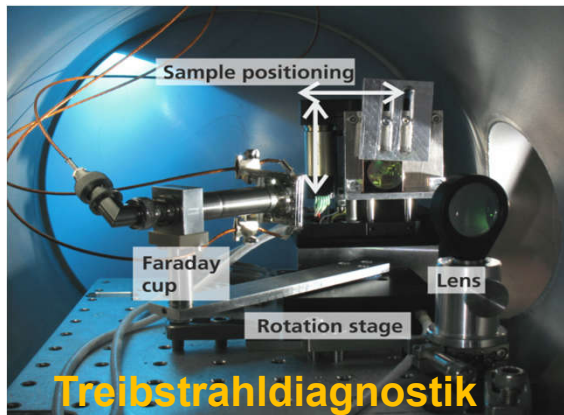


## Forschungsgebiete



### Kenngroßen:

- Impulsübertrag
- Ablatierte Masse
- Oberflächenqualität
- Jet: Geschwindigkeitsverteilung
  - Divergenz



### Optimierungsparameter:

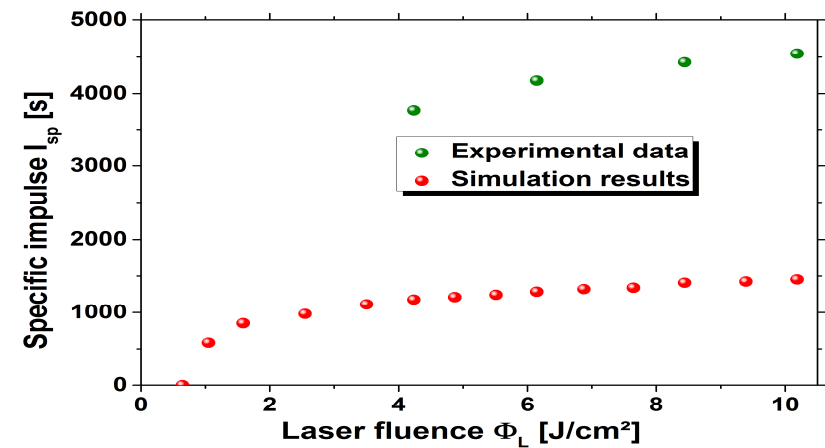
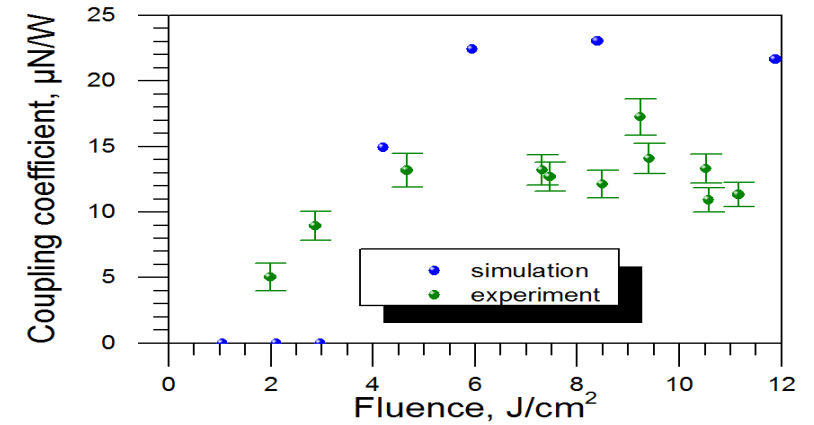
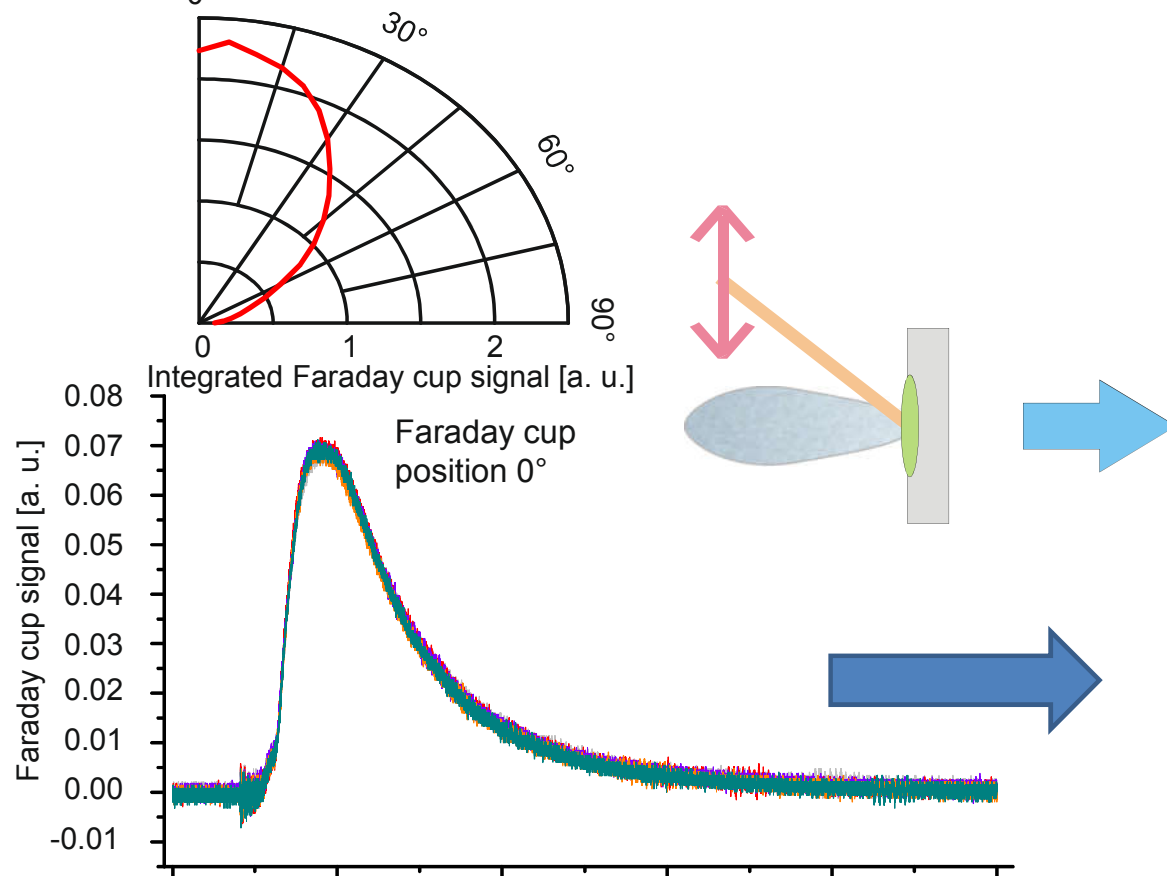
- Pulsdauer, -profil
- Wellenlänge
- Ablationsschema
- Material

### Ablationsprozess:

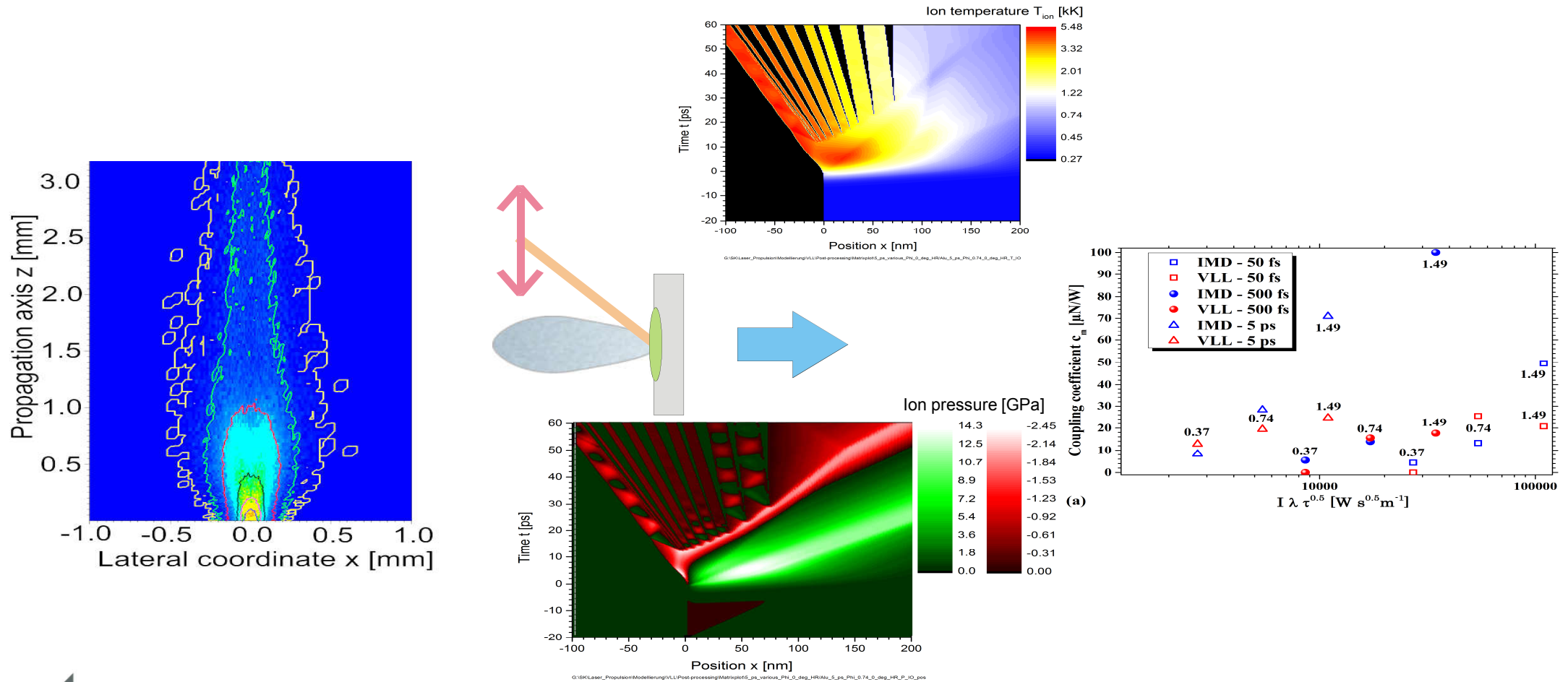
Molekulardynamik (IMD) / Hydrodynamik (Polly-2T)  
Plasmajet: DSMC-PIC-Simulation (PICLas)



# Experimente – Ablation von Aluminium

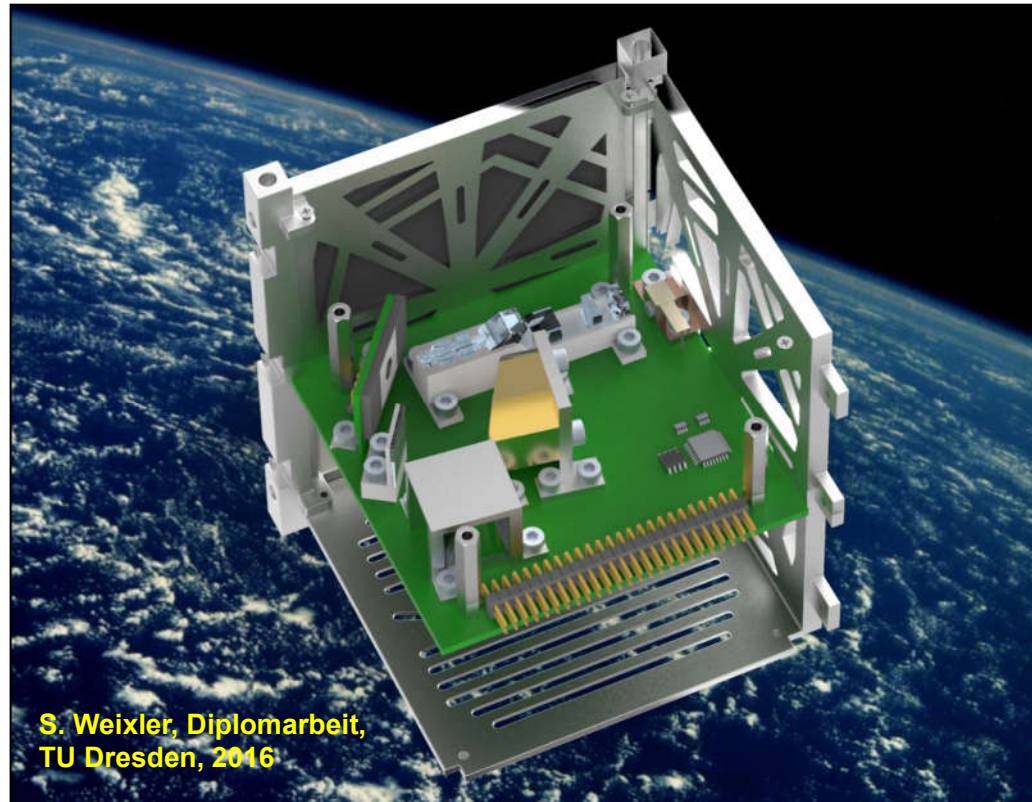


# Simulationen – Ablation von Aluminium

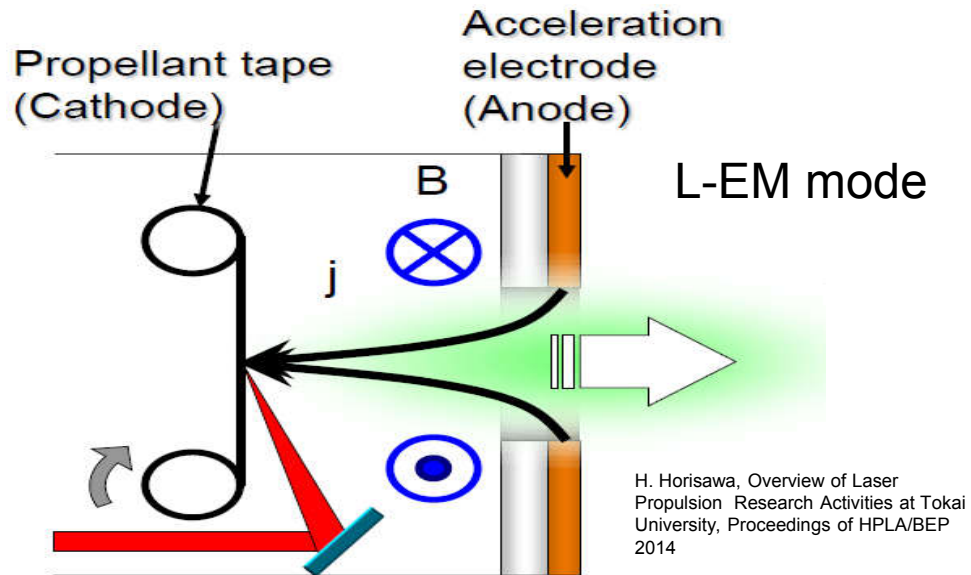




## Demonstrator-Entwicklung für Cubesat



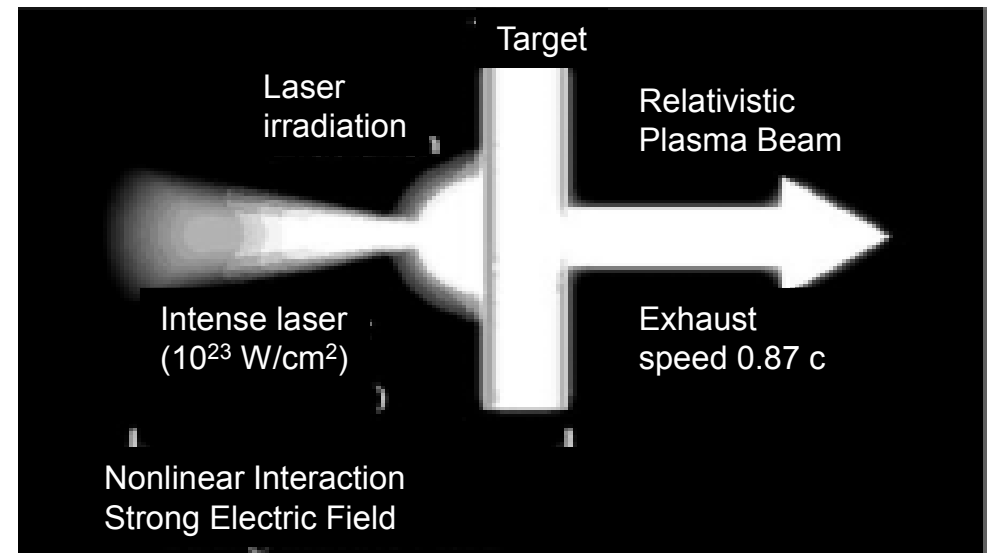
## Antriebskonzepte



*elektrostatisch (L-ES mode)*

+ *el. Entladung: elektrothermisch (LT mode)*

+ *große Stromstärken:*  
*elektromagnetisch durch Selbstinduktion*  
*(L-EM mode)*



*relativistisch*

Pulsdauer: 10 fs ... 5 ps

Schichtdicke: ~ 100 nm

### Coulomb-Explosion

- Erzeugung hochenergetischer Elektronen
- Aufbau eines elektrischen Feldes
- Expansion der Ionen in Plasmastrahl

Phipps et al, Review: Laser-Ablation Propulsion, J. Prop. Pow. **26(4)**, 609-637 (2010)





## Bedrohung durch Weltraummüll



Kollisionen

Größenordnungen letaler Objekte:

„Autos“ – 1%

einfaches Tracking und Ausweichen

„Radkappen“ – 3%, > 10 cm, < 2 kg

schwieriges Tracking und Ausweichen

„Granatsplitter“ – 96 %, > 1 g

derzeit kein Tracking,  
kein Ausweichen möglich

**Kessler- Syndrom**



nach: B. Esmiller: Cleanspace – Space debris removal by ground based laser, HPLA/BEP 2014



## Konzepte

### Weltraumgestütztes System

Schall 1990

Laser: 30 ... 100 kW, 100 Hz

Range: < 100 km



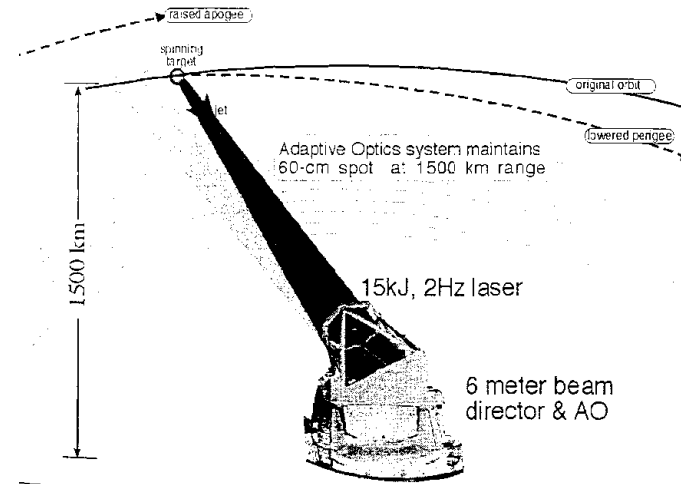
nach: B. Esmiller: Cleanspace – Space debris removal by ground based laser, HPLA/BEP 2014

### Erdgestütztes System (Orion)

Phipps et al. 1996

Laser: 15 kJ, 2 Hz

Range: 1500 km



EU-Projekt 2011 – 2014 (F, D, E, P)

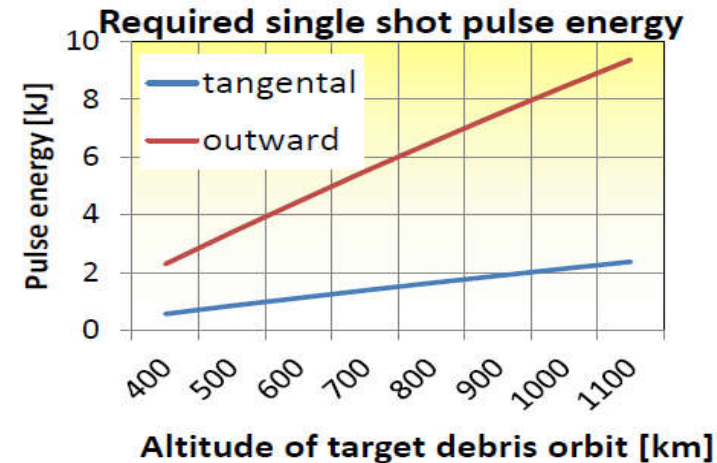
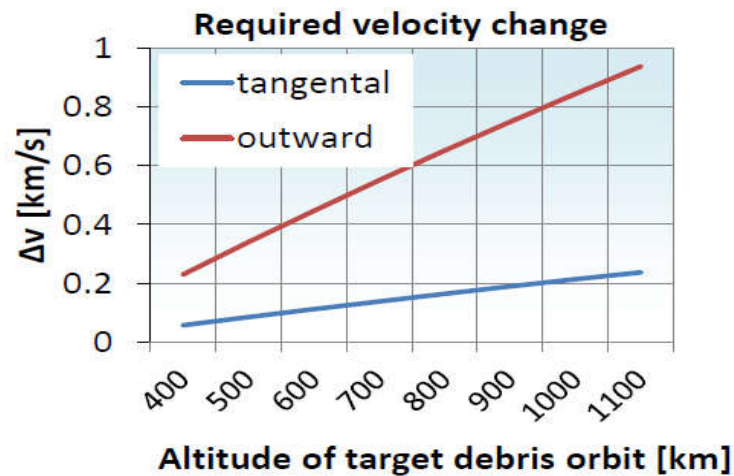
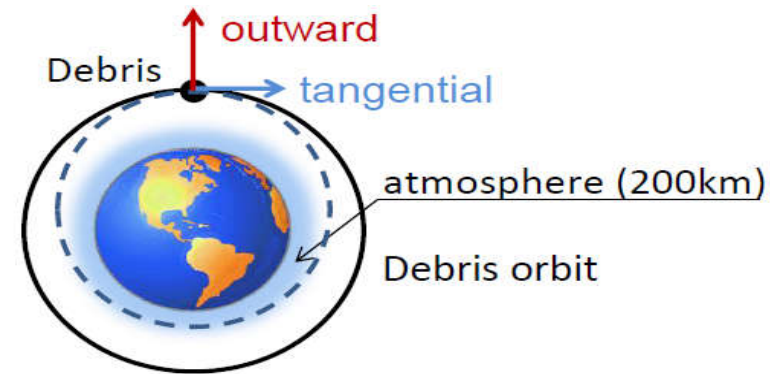
<http://www.clean-space.eu/>



## Weltraumgestützte Beseitigung

### Conditions:

- Debris' mass 1 g
- Momentum coupling coefficient  $C_m = 10 [\text{dyn/W}] = 100 \text{ N/MW}$
- atmospheric re-entry begins at the altitude of 200 km



K. Kawakami, Phase Conjugate Light Generation for Space Debris Removal, Proceedings of HPLA/BEP 2014



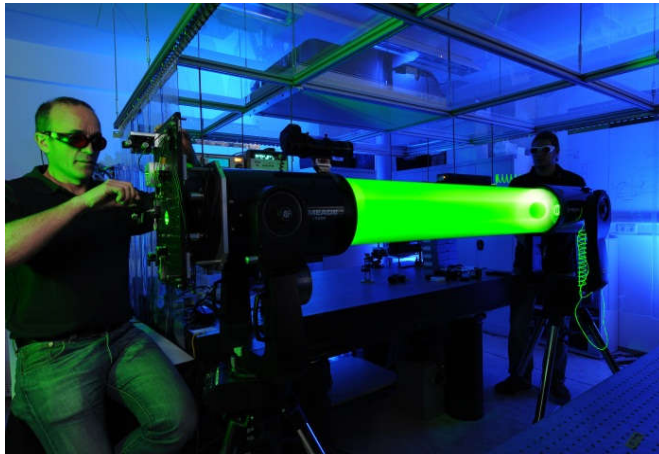


## CLEANSPACE – Detection, Ranging & Tracking

- ▶ Detektion von Weltraummüll mit  $\varnothing \geq 1 \text{ cm}$
- ▶ Tracking-Genauigkeiten  $\leq 100 \text{ nrad}$
- ▶ Adaptive Optik zu Turbulenzkompensation
- ▶ Laser-ranging (Time-of-flight)



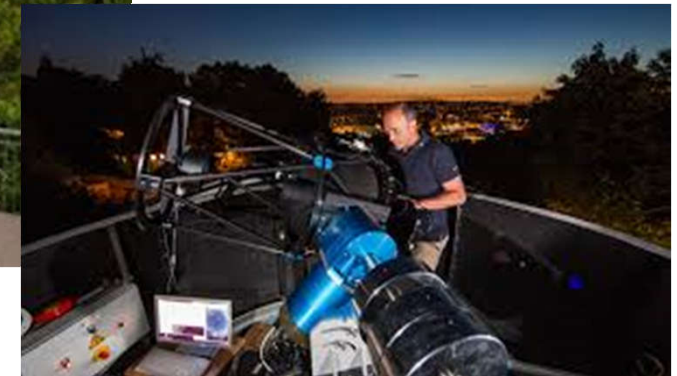
Spur eines Debris-Objekts



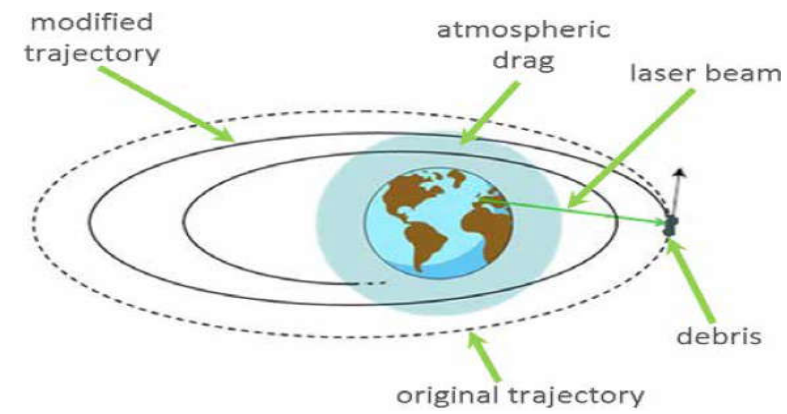
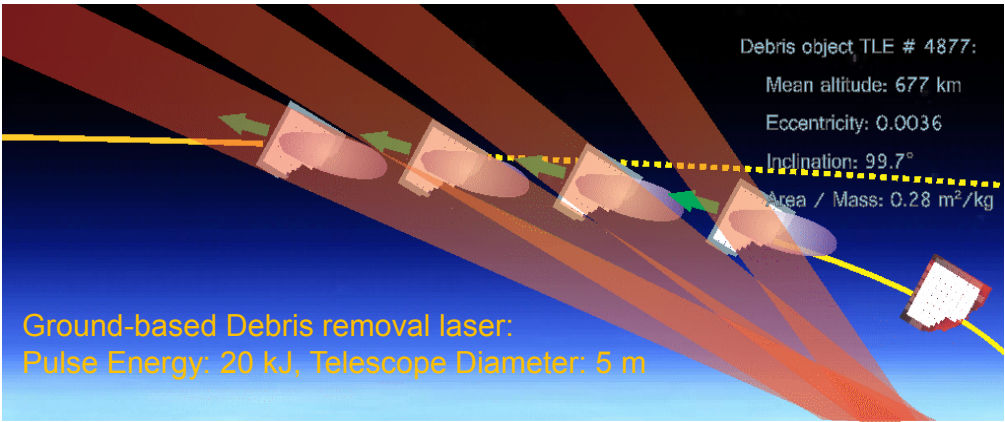
Laborexperiment



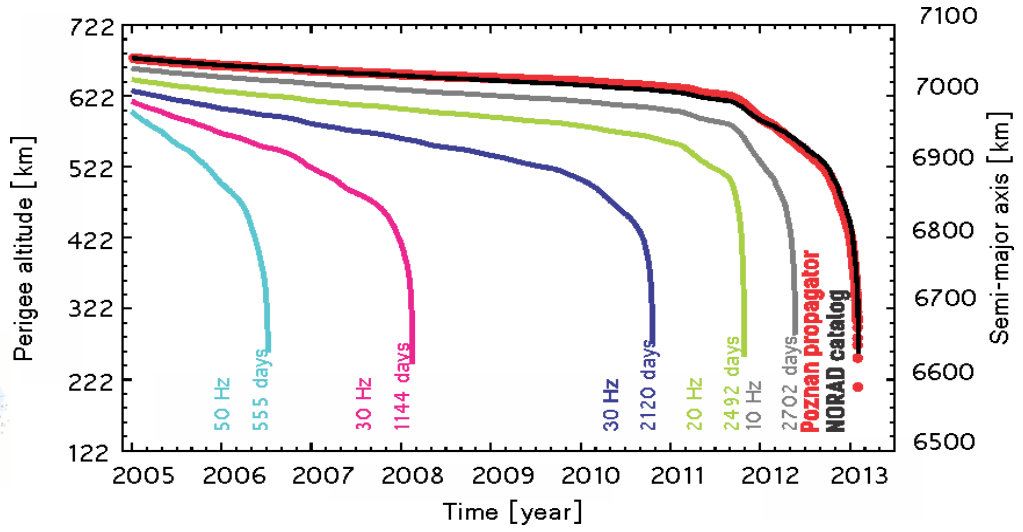
Beobachtungsstation  
Uhlandshöhe, Stuttgart



# CLEANSPACE – Beseitigung von Debris

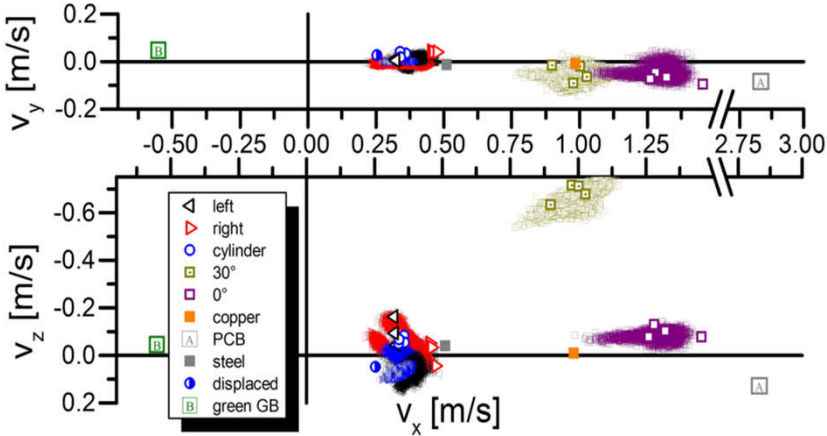
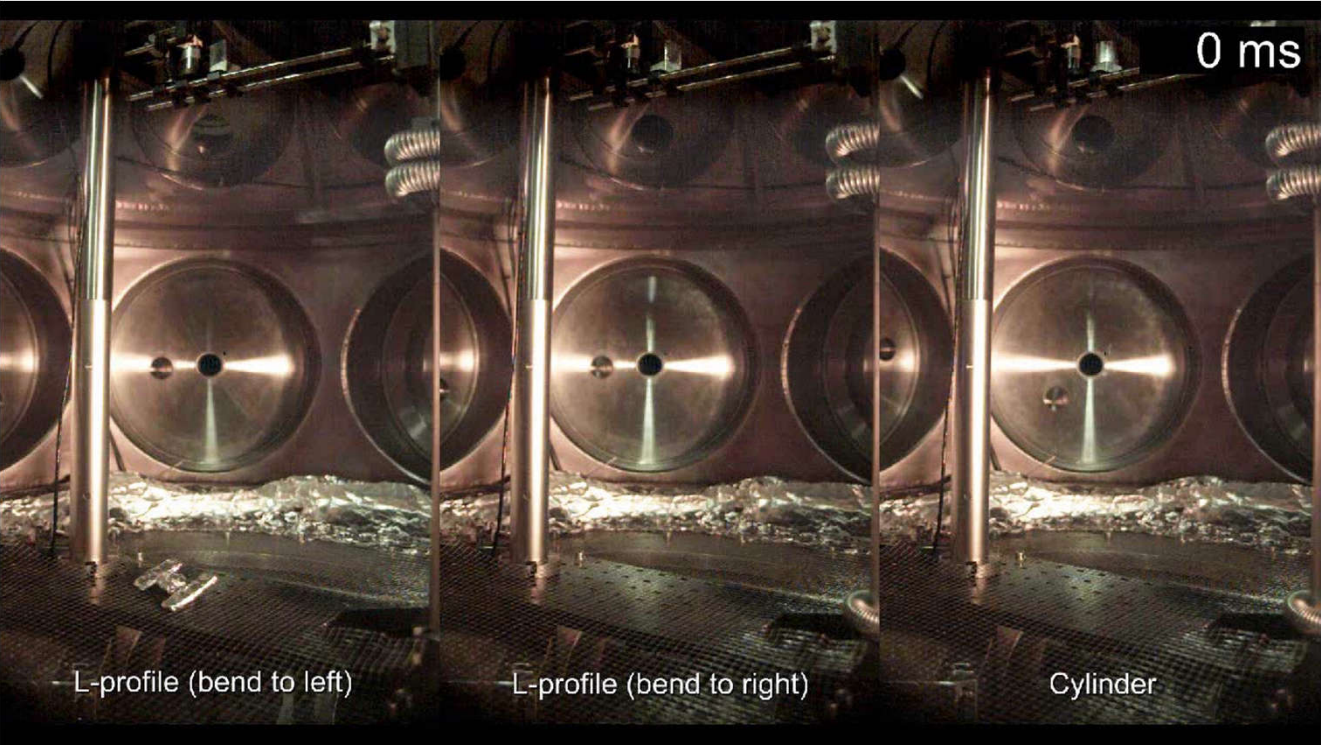


- Spotgröße am Target: Ø 0,5 m
- Laserpuls  $E_L \leq 15 \text{ kJ} \rightarrow \Phi \geq 7,5 \text{ J/cm}^2$
- Rep.-rate  $f_{rep} > 10 \text{ Hz} \rightarrow \bar{P} > 150 \text{ kW}$
- Wellenlänge:  $\lambda = 1,0 \dots 1,1 \text{ }\mu\text{m}$





# Impulserzeugung

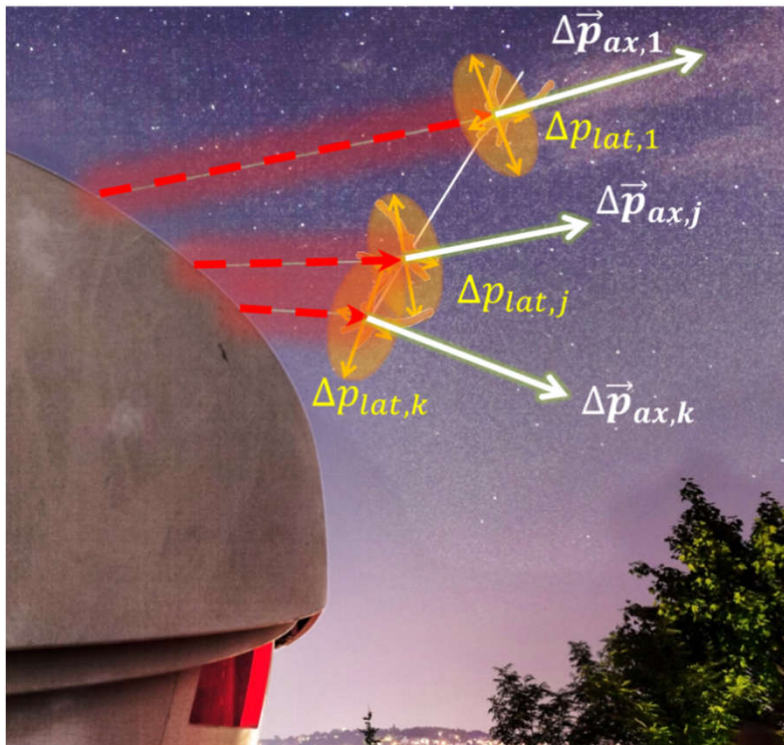


R. Lorbeer et al., *Scientific Reports* **8**: 8453 (2018) (open access)  
<http://www.nature.com/articles/s41598-018-26336-1>

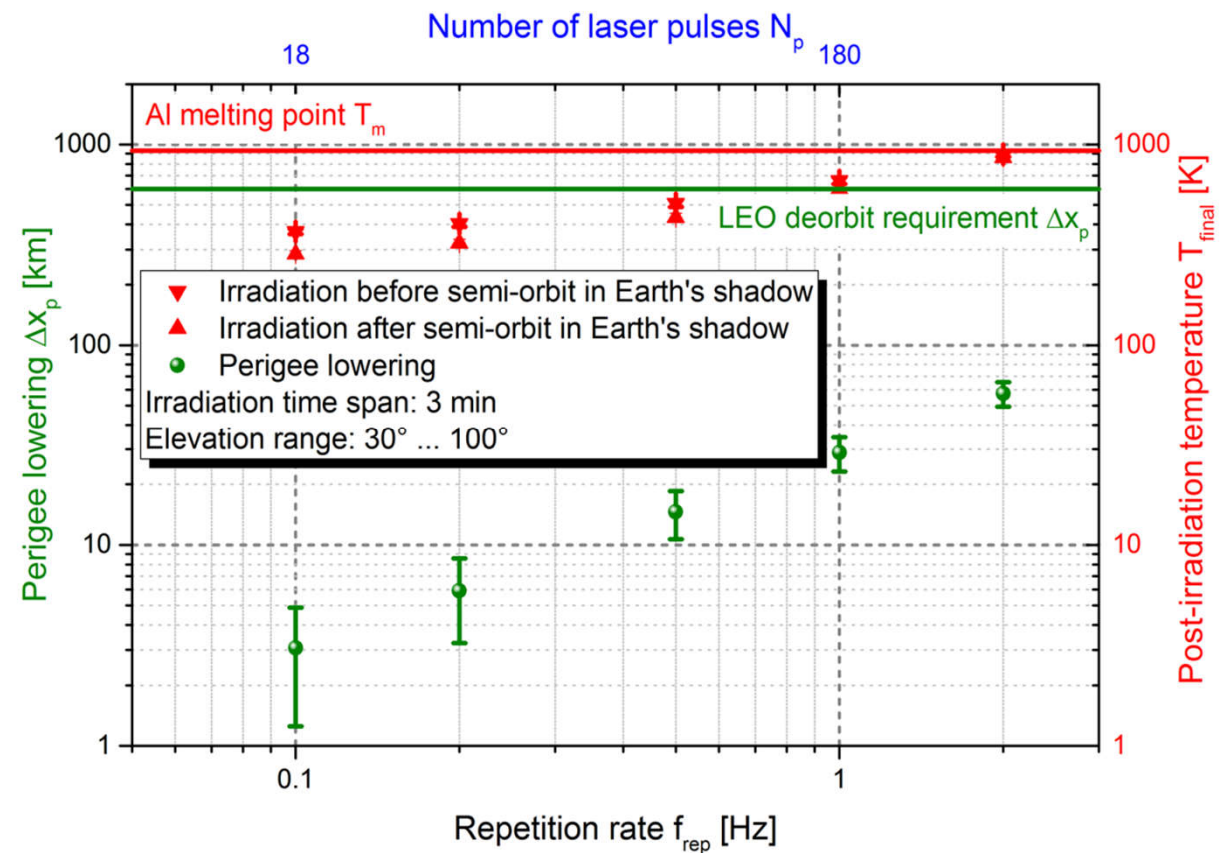




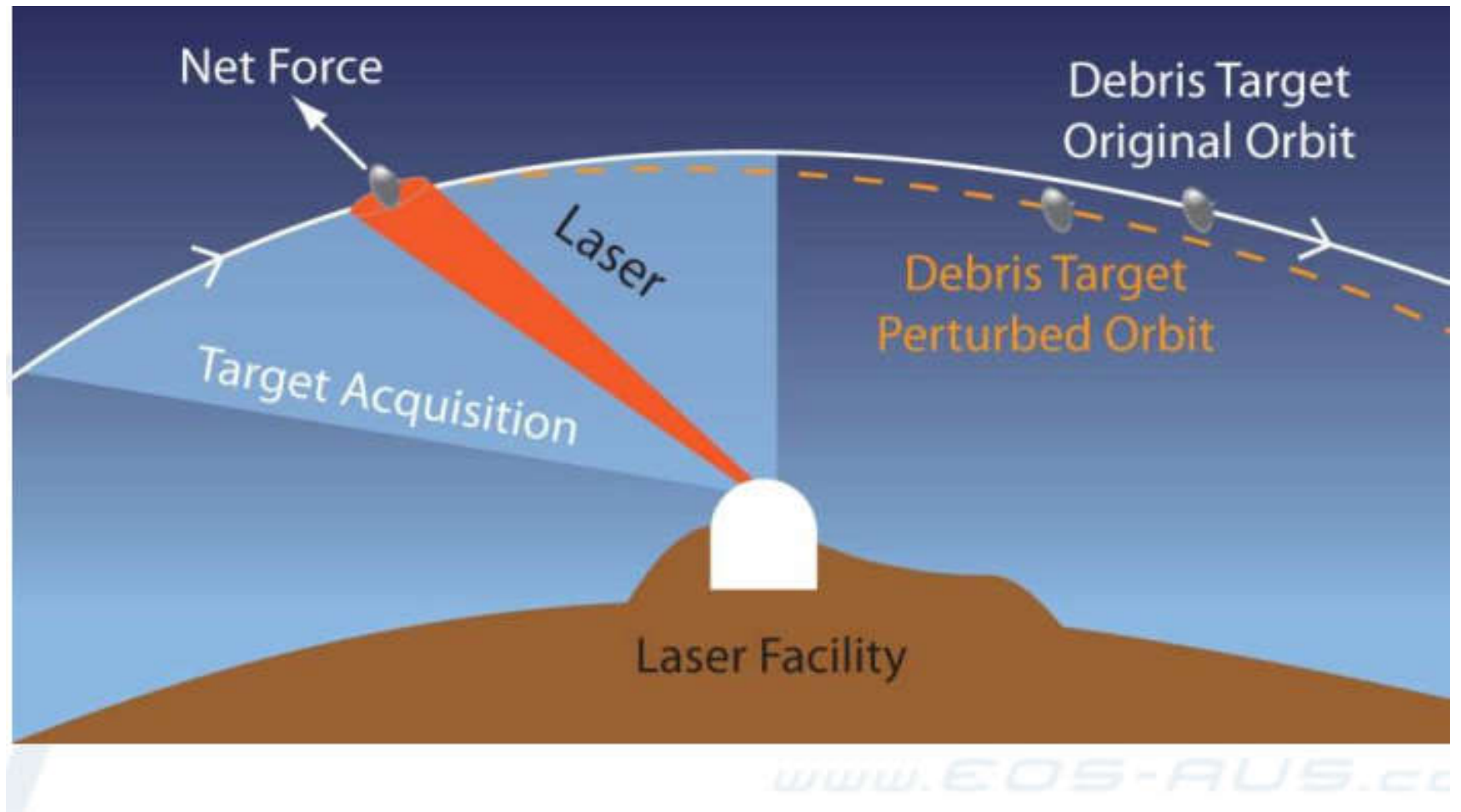
## Vorhersagbarkeit des Impulsübertrags und Wärmeakkumulation



S. Scharring et al., Opt. Eng. 58(1): 011004 (2018) (Open access)  
<http://spie.org/publications/journal/10.1117/1.OE.58.1.011004?SSO=1>



## Zwischenlösung: Kollisionsvermeidung mit Photonendruck



## Photon pressure – a rough estimation

$$\vec{F} = c_m \cdot I \cdot A \cdot \hat{k} \qquad c_m = 3.3 \text{ nN/W}$$

Collision avoidance:  $\Delta v = 1 \text{ cm/s} \rightarrow \Delta x = 2.5 \text{ km/d}$

J. Mason et al., Adv. Space Res. **48**: 1643 (2011)  
doi:10.1016/j.asr.2011.08.005

$$\Delta v = \frac{F \cdot \Delta t}{m} = \frac{c_m \cdot I \cdot A_{proj} \cdot \Delta t}{m} = \frac{c_m \cdot P_L \cdot \Delta t}{m}$$

(Target projected area  $\equiv$  Laser spot area)

Single transit, irradiation time  $\Delta t = 5 \text{ min}$ , direction change neglected

$$\rightarrow \Delta v = \frac{3.3 \text{ } \mu\text{N/kW} \cdot P_L[\text{kW}] \cdot 300\text{s}}{m} = \frac{P_L[\text{kW}] \cdot 1\text{mNs}}{m} = \underset{\text{(absorptive)}}{1 \text{ mm/s} \cdot \frac{P_L[\text{kW}]}{m[\text{kg}]}} \rightarrow \underset{\text{(reflective)}}{2 \text{ mm/s} \cdot \frac{P_L[\text{kW}]}{m[\text{kg}]}}$$

**Example: Westpac Satellite**,  $m = 23.8 \text{ kg}$ , Retro-Reflection:  $c_m = 2/c$

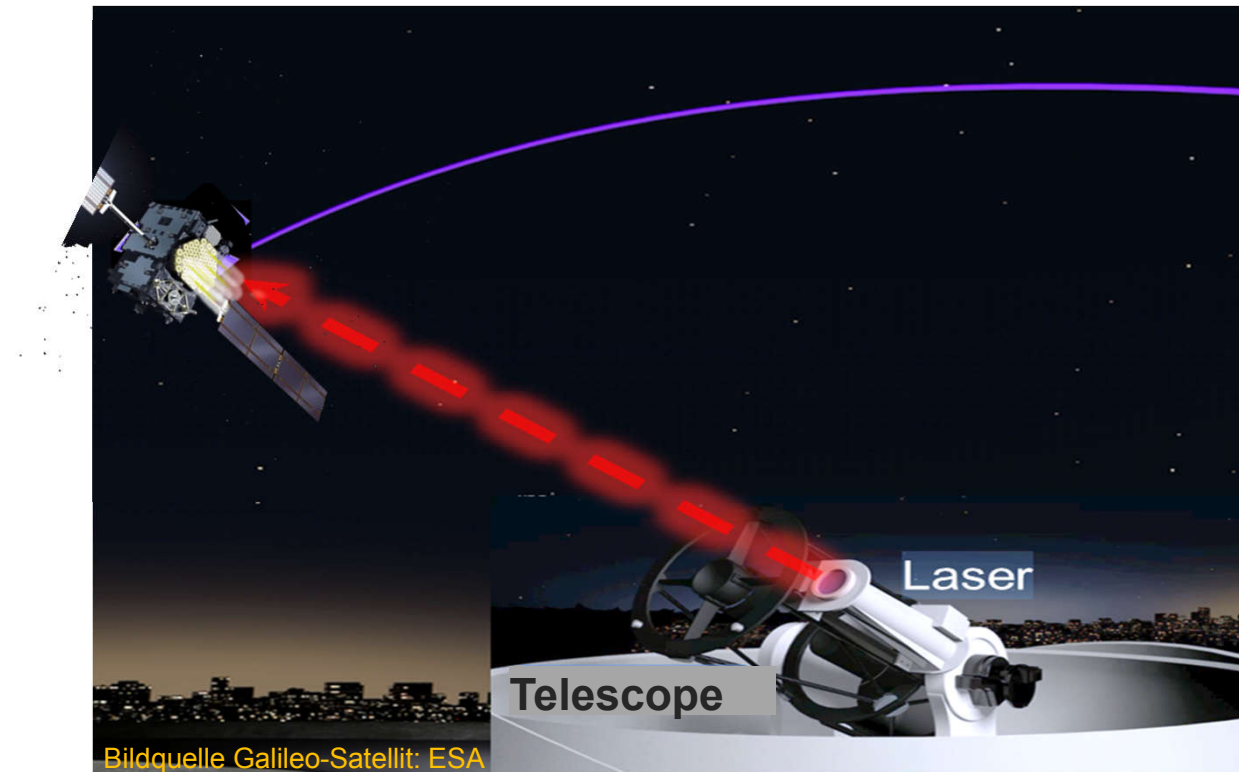
$$\rightarrow \Delta v = 84 \text{ } \mu\text{m/s} \cdot P_L[\text{kW}] \quad \rightarrow \Delta v = 0.84 \text{ mm/s} \quad \rightarrow N_{transits} \geq 12$$

$P_L = 10 \text{ kW}$



## Müllvermeidung: Post-Mission Disposal

- ▶ Compliance mit 25-Jahre-Regel für PMD erforderlich
- ▶ Externe Energiezufuhr durch Laser
  - Erweiterung der Grenzen von  
CP (max.  $I_{sp}$  → Treibstoffmenge) bzw.  
EP (max.  $P_{el,solar}$  → Schub)



→ *Masterarbeit zu vergeben*, [https://www.dlr.de/dlr/jobs/desktopdefault.aspx/tabid-10596/1003\\_read-30328/](https://www.dlr.de/dlr/jobs/desktopdefault.aspx/tabid-10596/1003_read-30328/)



# Inhalt

## 1 Einleitung

## 2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Beispiele
- > 2.3 Ausbreitung von Laserstrahlung

## 3 Antriebskonzepte

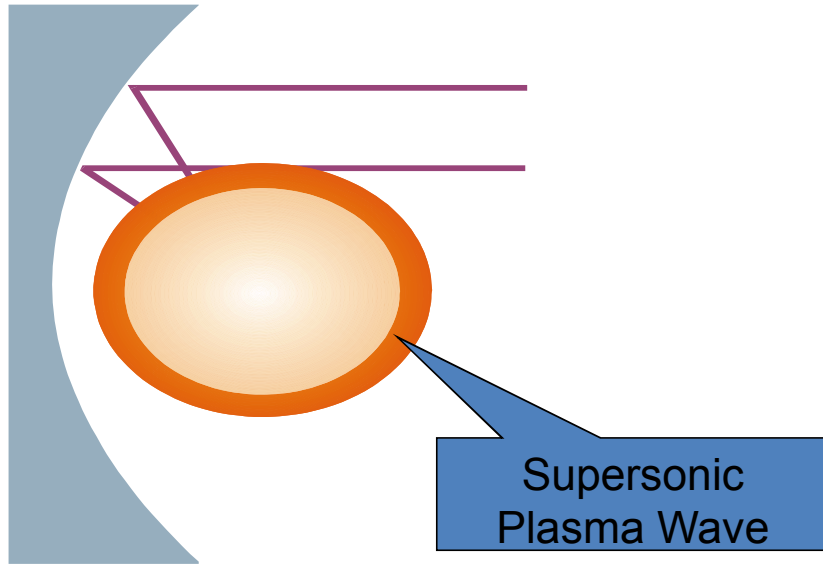
- > 3.1 Überblick
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > **3.3 Laser Lightcraft**
  - > 3.3.1 Detonationsprozesse
  - > 3.3.2 Lightcraft Technology Demonstrator
  - > 3.3.3 Parabolisches Lightcraft (DLR)
  - > 3.3.4 Russland - ASLPE
  - > 3.3.5 Earth-based LEO launch

## 4 Zusammenfassung





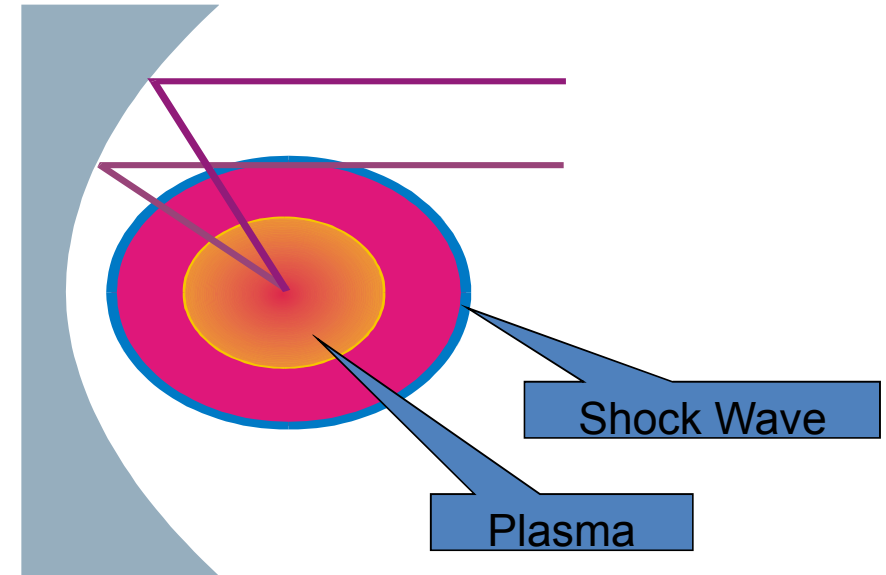
## Lasergestützte Absorptionswellen



$$\omega_{Plasma} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}} \rightarrow \omega_{Laser}$$

**Laser Supported Detonation Wave (LSD)**

$$I > 10^7 \text{ W/cm}^2$$



$$\omega_{Plasma} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}} \ll \omega_{Laser}$$

**Laser Supported Combustion Wave (LSC)**

$$I < 10^7 \text{ W/cm}^2$$





## Detonation ablativer Treibstoffe

Interne Effizienz für reine Ablation (s.o.):

$$\eta_{\text{int}} = \frac{1}{2} c_m \cdot v_{\text{jet}} = \alpha \beta$$

$\beta$  Absorptionseffizienz  
 $\alpha$  Expansionseffizienz

Interne Effizienz für exotherme Reaktionen:

$$\eta_{\text{int}} = \alpha (\beta + mQ / E_L)$$

$Q$  Spezifische Reaktionswärme  
 $E_L$  Laserpulsenergie

mit  $Q = Q_{\text{det}} + N_{\text{db}} Q_{\text{db}}$

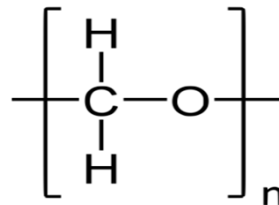
$Q_{\text{det}}$  Spezifische Detonationsenergie

$Q_{\text{db}}$  Spez. Energie für  
verzögerte Verbrennung

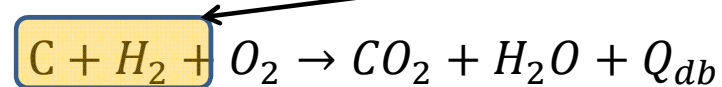
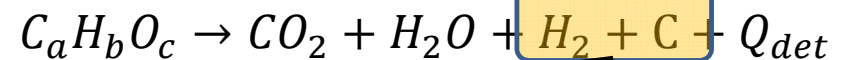
Bsp: Polyoxymethylen  
(Delrin, POM)

$$Q_{\text{det}} = 2,69 \text{ J/mg}$$

$$Q_{\text{db}} = 16,1 \text{ J/mg}$$



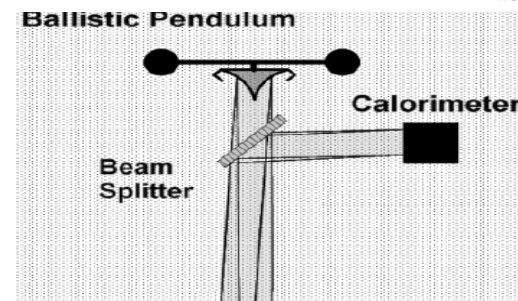
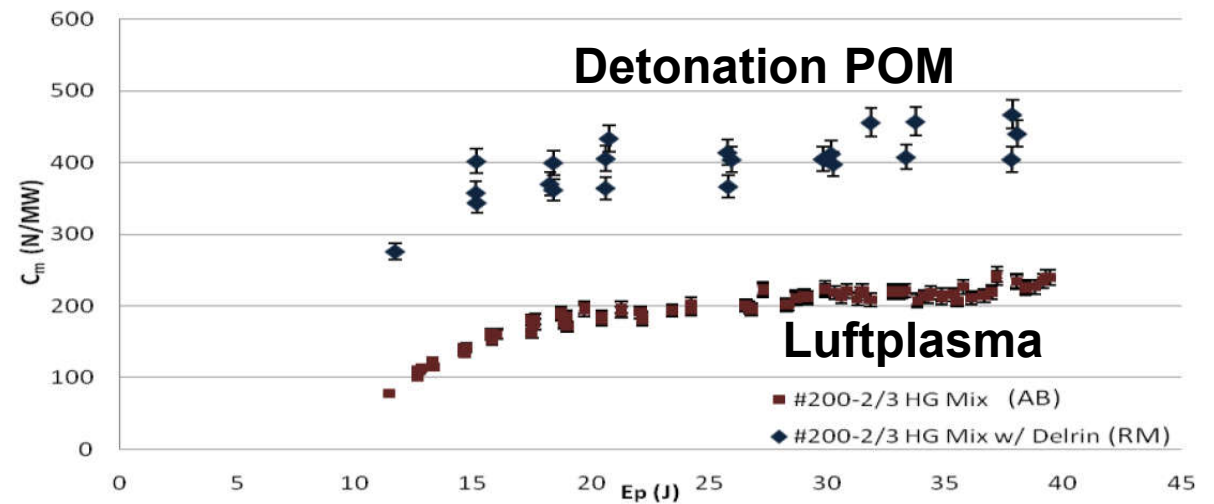
Beispiel: CHO-Polymere



A.A. Ageichik et al, Detonation of CHO Working Substances in a  
Laser Jet Engine,  
Technical Physics **54(3)**, 402 – 409 (2009)



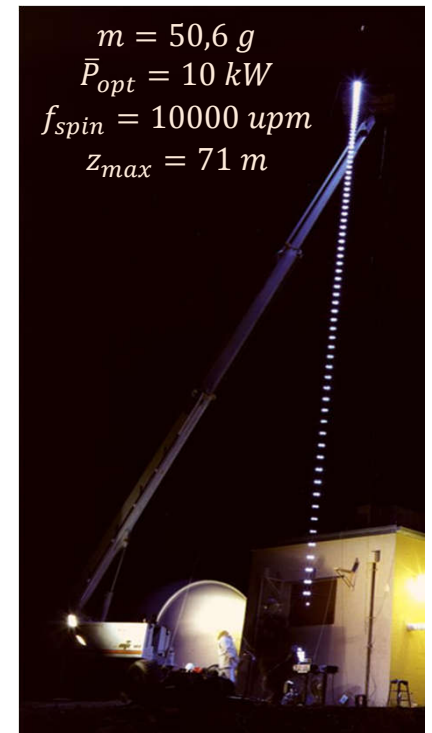
## Pendelexperiment



D.A. Kenoyer et al, Axial Impulse  
Generation of Lightcraft Engines with  
~ 1  $\mu$ s Pulsed TEA CO<sub>2</sub> Laser,  
AIP Conf. Proc. **1402**, 82 – 92 (2011)



## Weltrekordflug

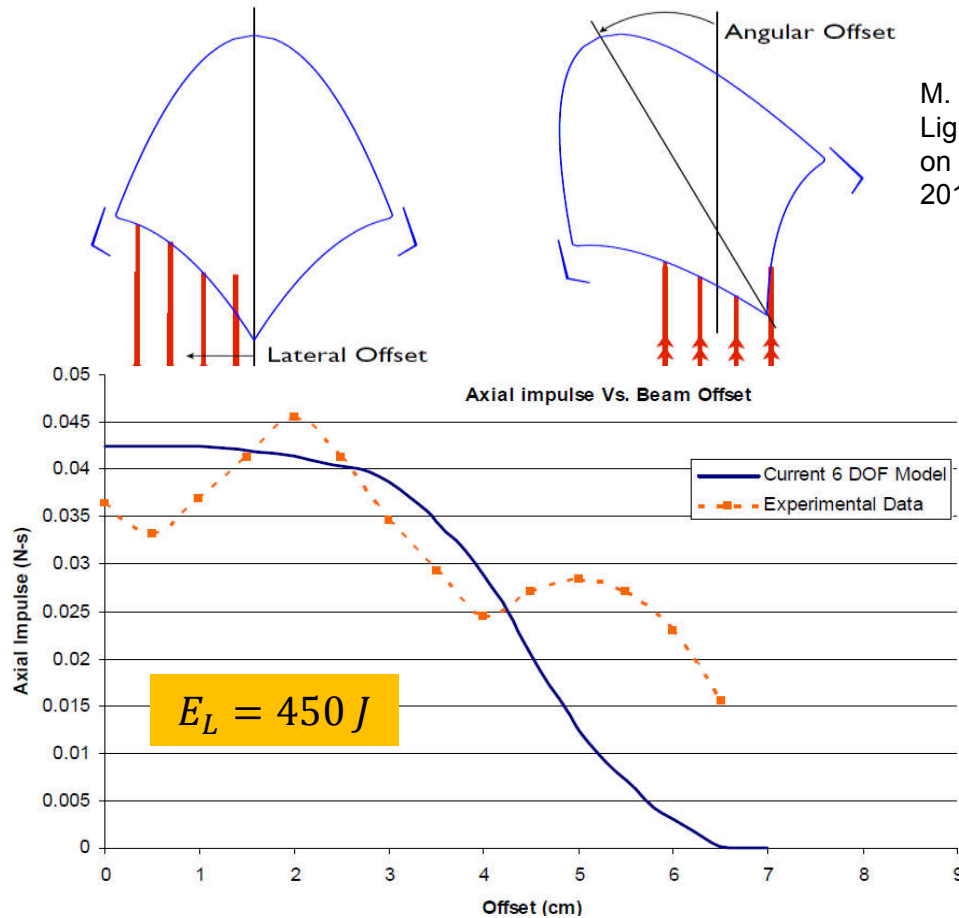


$$\begin{aligned}
 m &= 50,6 \text{ g} \\
 \bar{P}_{opt} &= 10 \text{ kW} \\
 f_{spin} &= 10000 \text{ upm} \\
 z_{max} &= 71 \text{ m}
 \end{aligned}$$

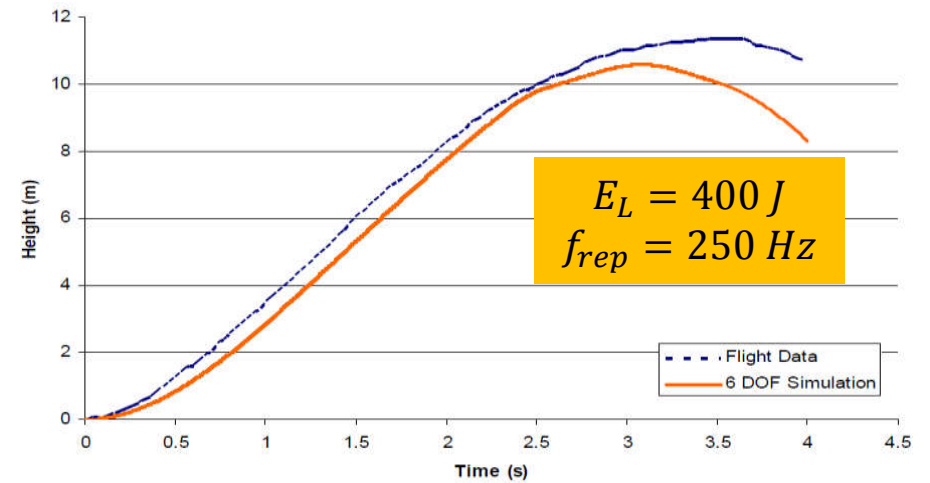
L.N. Myrabo, World Record Flights of Beam-Riding Rocket Lightcraft: Demonstration of „Disruptive Propulsion Technology, AIAA Paper 2001-3798



## Flugbahnanalyse



M. Takahashi and N. Ohnishi, Flight analysis of Lightcraft using Actively-Controlled Beam Based on Genetic Algorithm, Proceedings of HPLA/BEP 2014



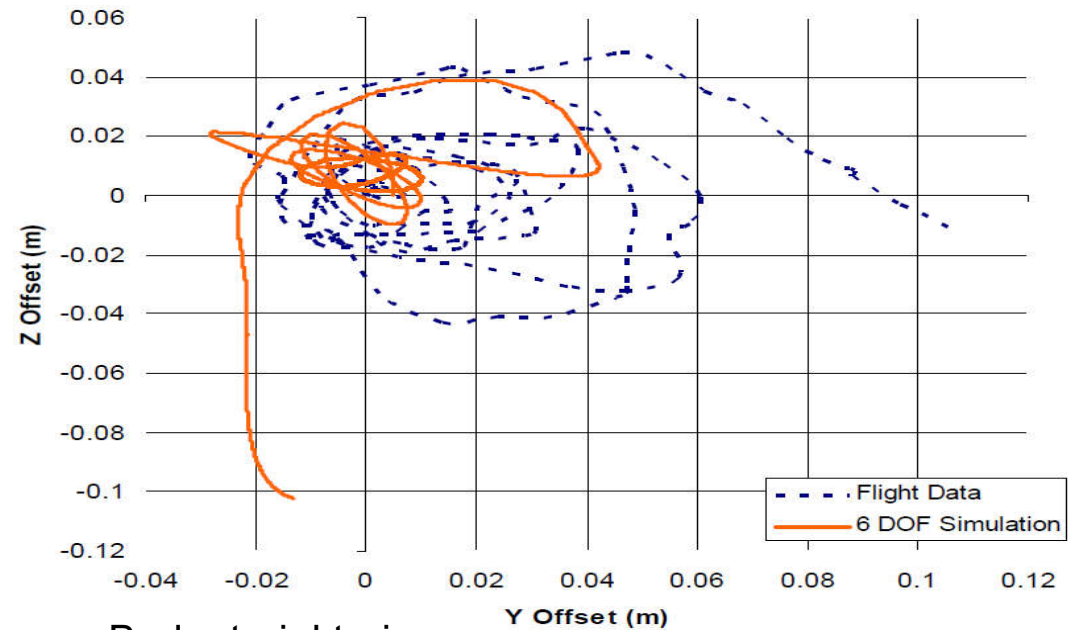
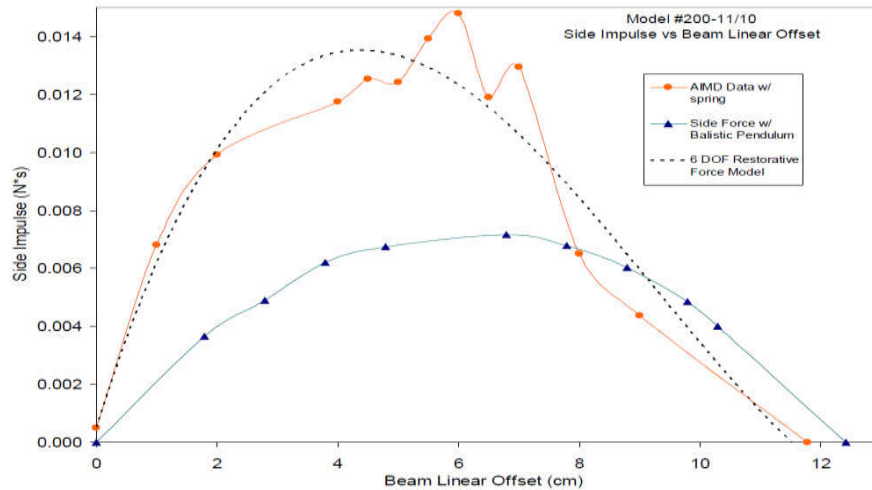
### Simulationsrechnung mit aerodyn. Kräften

D.A. Kenoyer et al, Validation and Calibration of a 6-DOF Laser Propelled Lightcraft Flight Dynamics Model vs. Experimental Data, AIP Conf. Proc. **997**, 325 – 337 (2008)





## Lateralbewegung

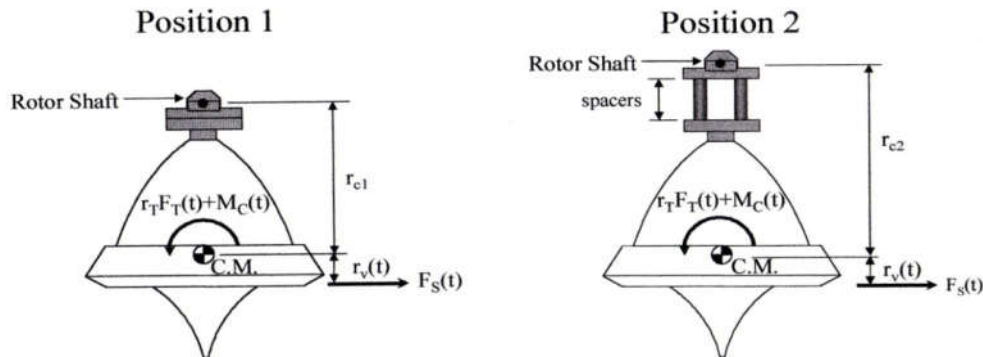


## Bodentrajektorien

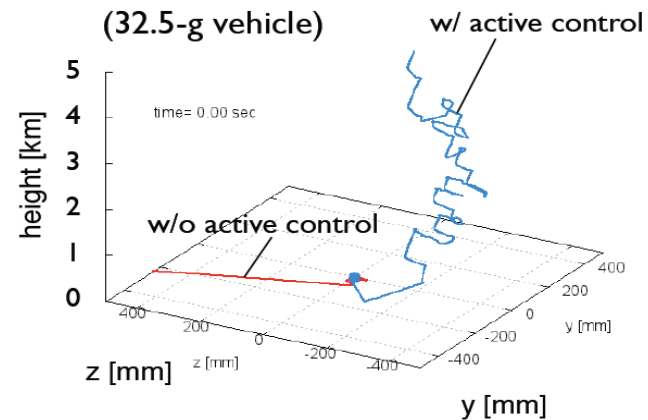
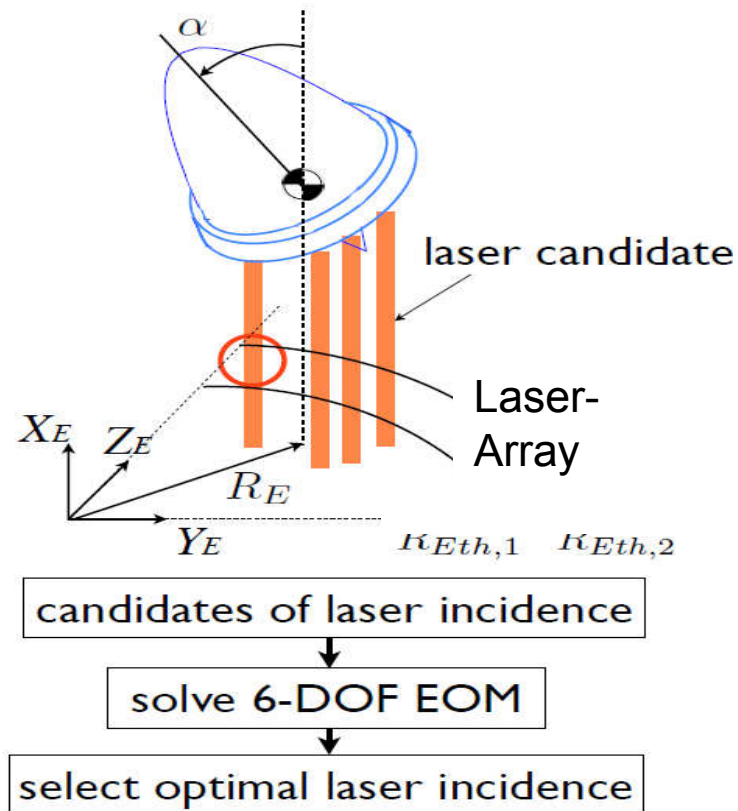
D.A. Kenoyer et al, ebd.

## Angular Impulse Measurement Device (AIMD):

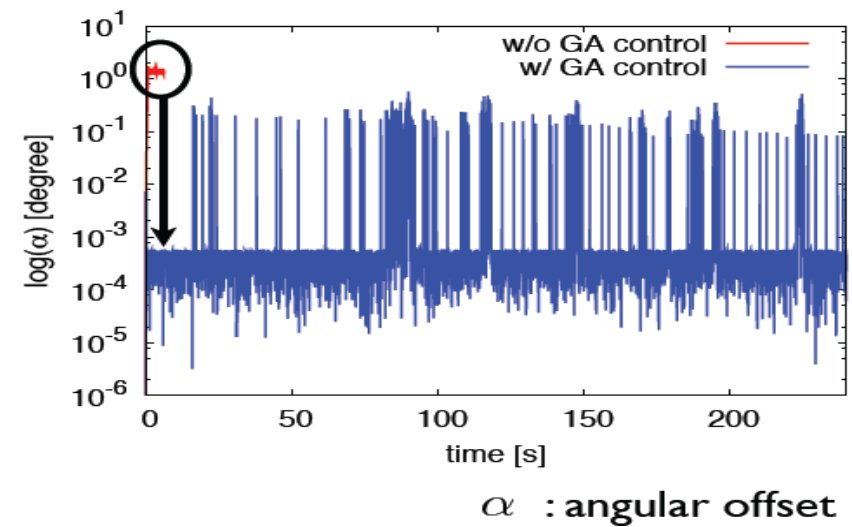
- Drehimpuls auf Rotor bei verschiedenen Trägheitsmomenten
- ↓
- Drehimpuls, Lateralimpuls auf Lightcraft



# Flugstabilisierung

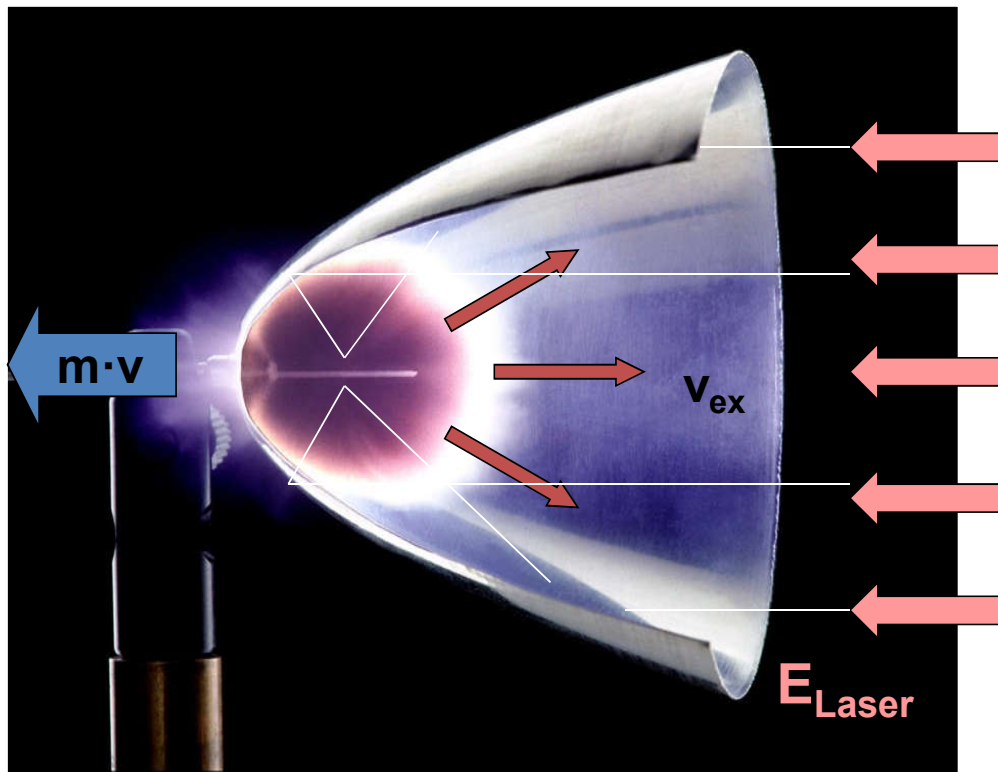


M. Takahashi and N. Ohnishi, Flight analysis of Lightcraft using Actively-Controlled Beam Based on Genetic Algorithm, Proceedings of HPLA/BEP 2014

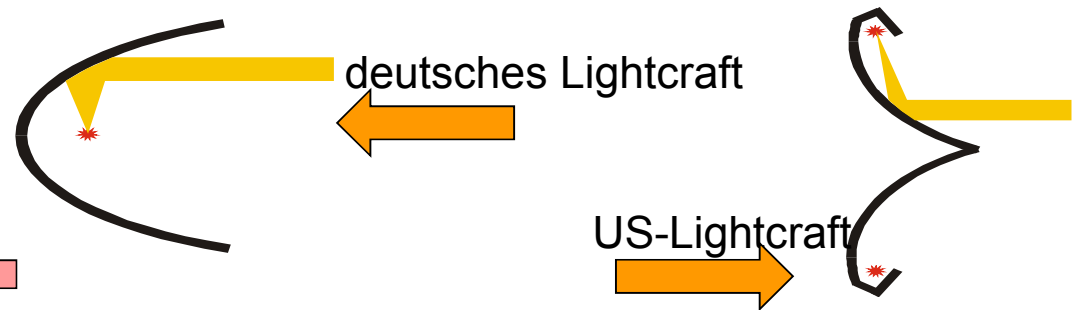




## Funktionsprinzip



**Air Plasma**

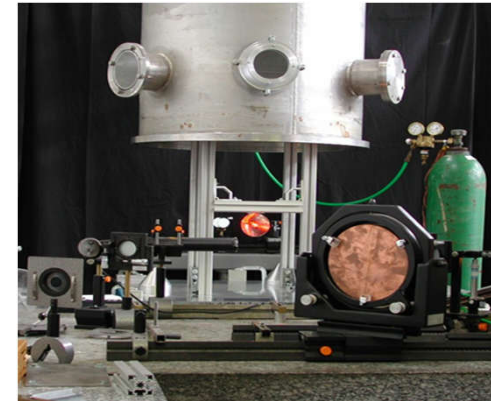
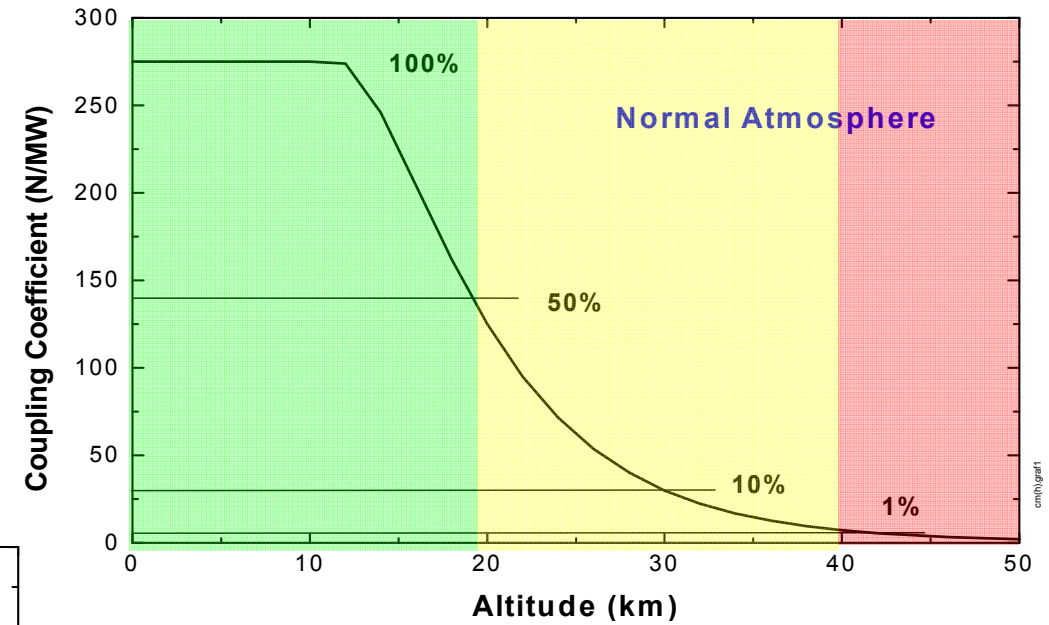
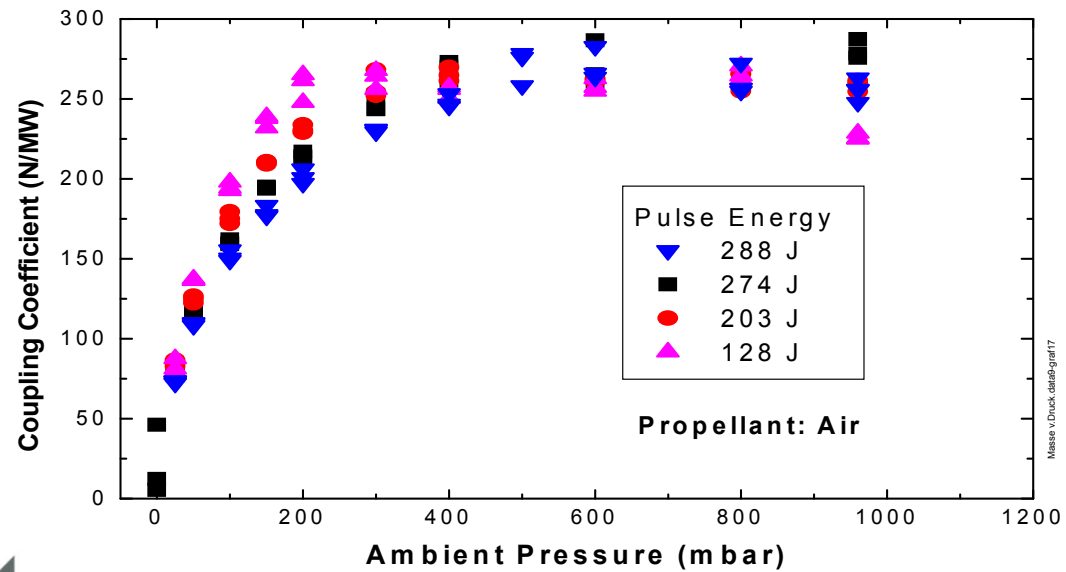


**Laserpulsenergie  $E_L = 20 \dots 200 \text{ J}$**   
**Pulsdauer  $\sim 8 \dots 12 \mu\text{s}$**

- ⇒ **Fokusintensität  $> 10^7 \text{ W/cm}^2$**
- ⇒ **Plasmazündung**
- ⇒ **Schnell expandierendes Plasma**
- ⇒ **Impulsübertrag durch Druckanstieg und ausströmende Materie (Treibstoff/Luft)**

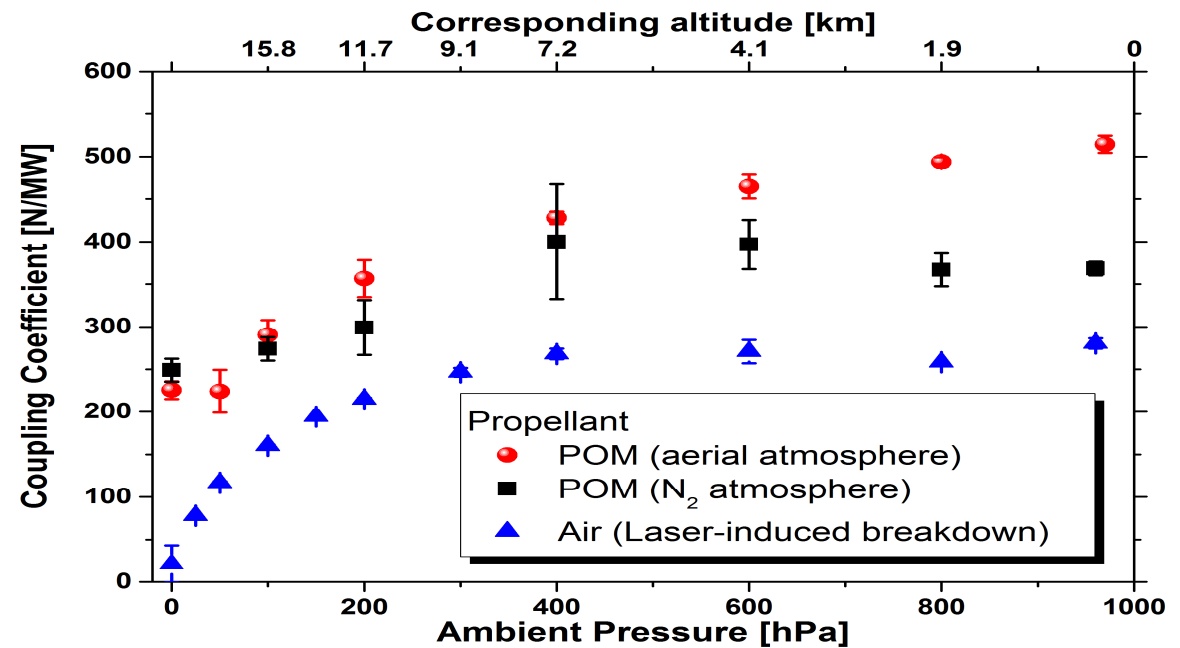
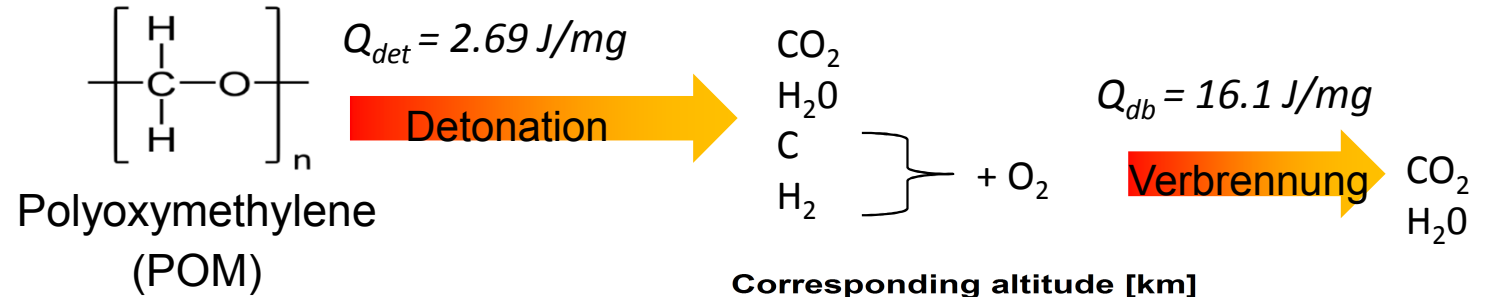
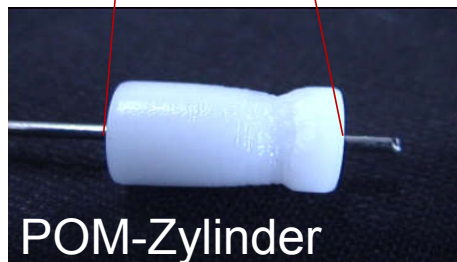
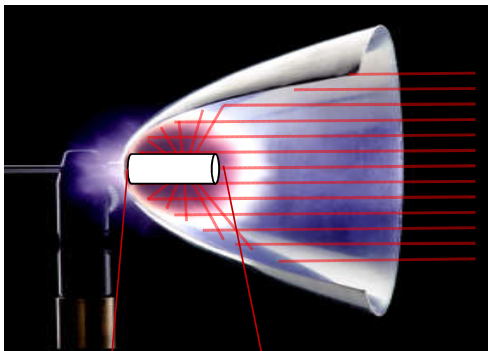


## Höhensimulation – ohne Treibstoff

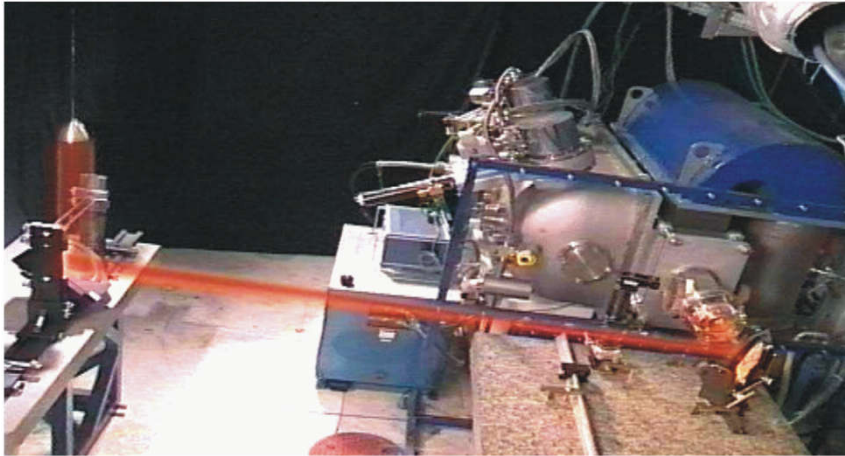


Ballistisches Pendel  
im Vakuumtank

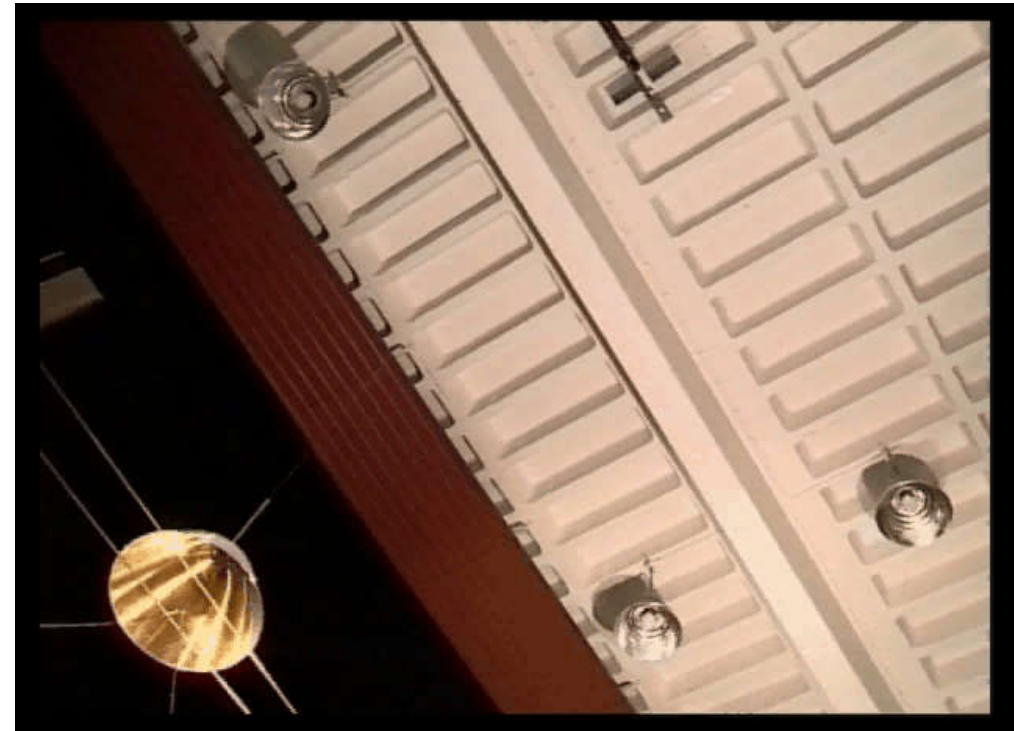
## Verwendung von Treibstoff



## Drahtgeführte Flugexperimente

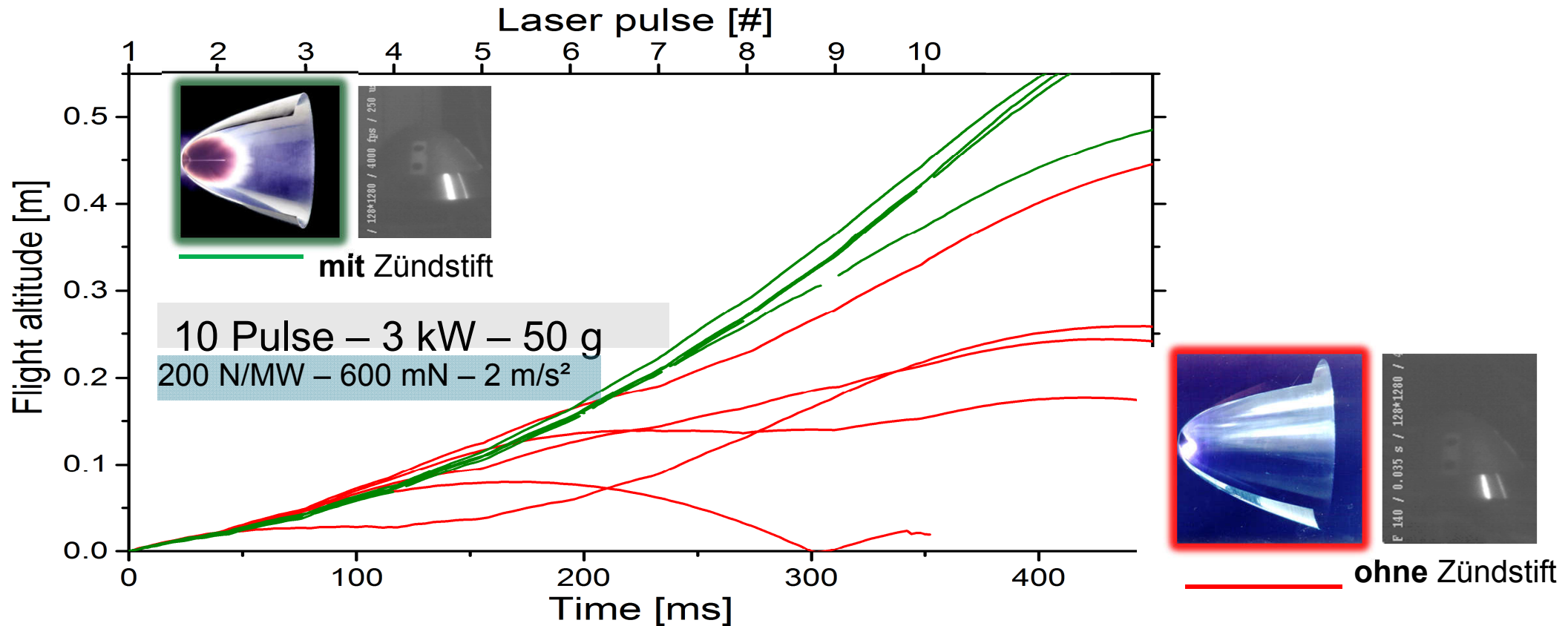


- Flughöhe 6 m
- 8 Pulse, 80 J, 15 Hz
- Beschleunigung  $\sim 1g$
- $m = 22 \dots 55 \text{ g}$
- Schub  $T = 1,05 \text{ N}$
- Ohne Treibstoff
- drahtgeführt



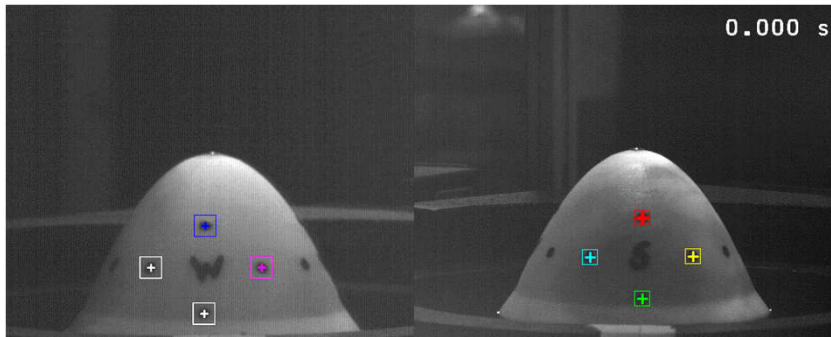


## Freiflugexperimente ohne Spin





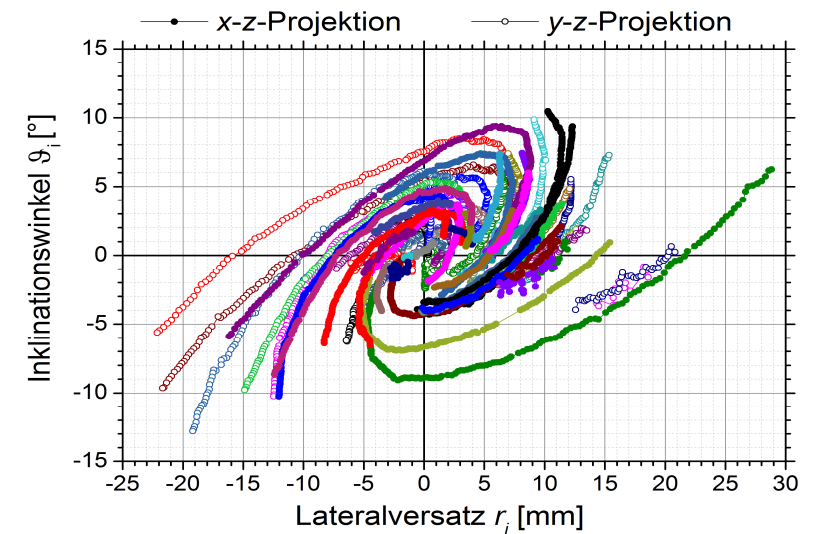
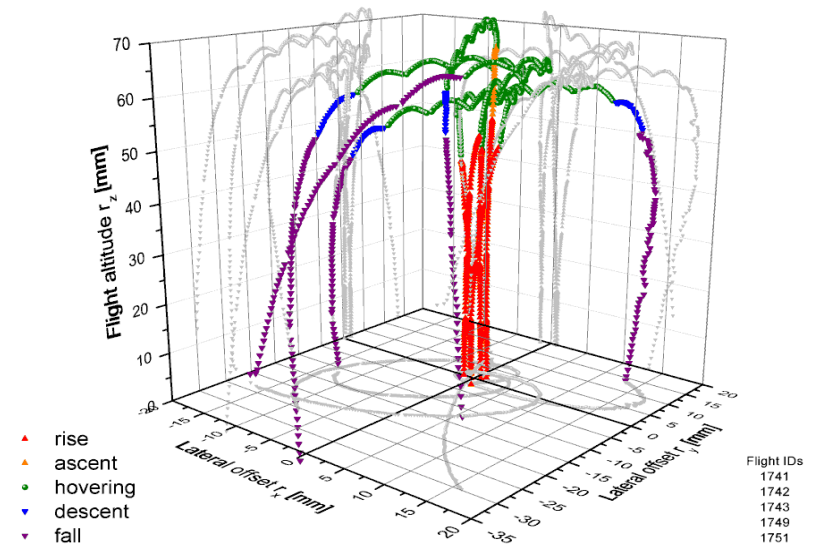
## Trajektorienanalyse



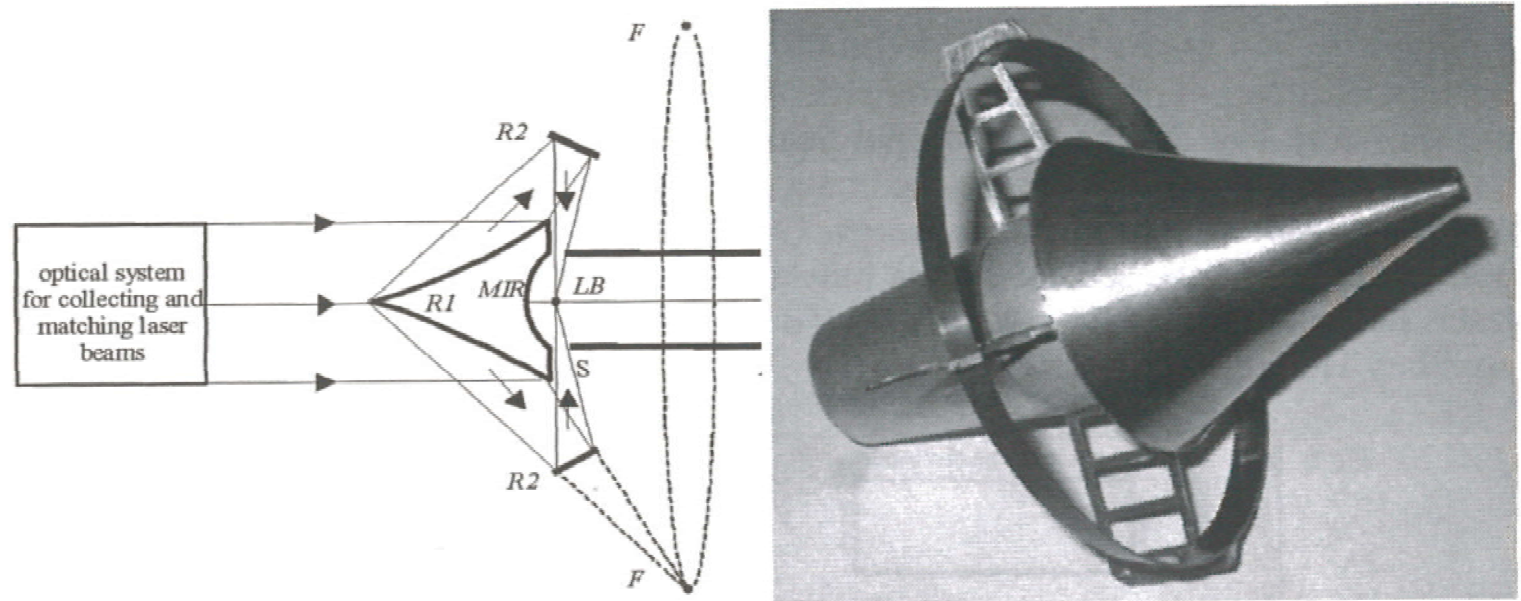
- Hochgeschwindigkeitsaufnahmen (500 Bilder/s) aus 2 Perspektiven (45°-Spiegel)
- Rekonstruktion von Trajektorie und räumlicher Orientierung
- Bestimmung der Impulskomponenten

S. Scharring et al, Beam-Riding Analysis of a Parabolic Laser-thermal Thruster, AIP Conf. Proc. **1402**, 115 – 131 (2011)

S. Scharring, Dissertation, Universität Stuttgart (2013)



## Aerospace Laser Propulsion Engine



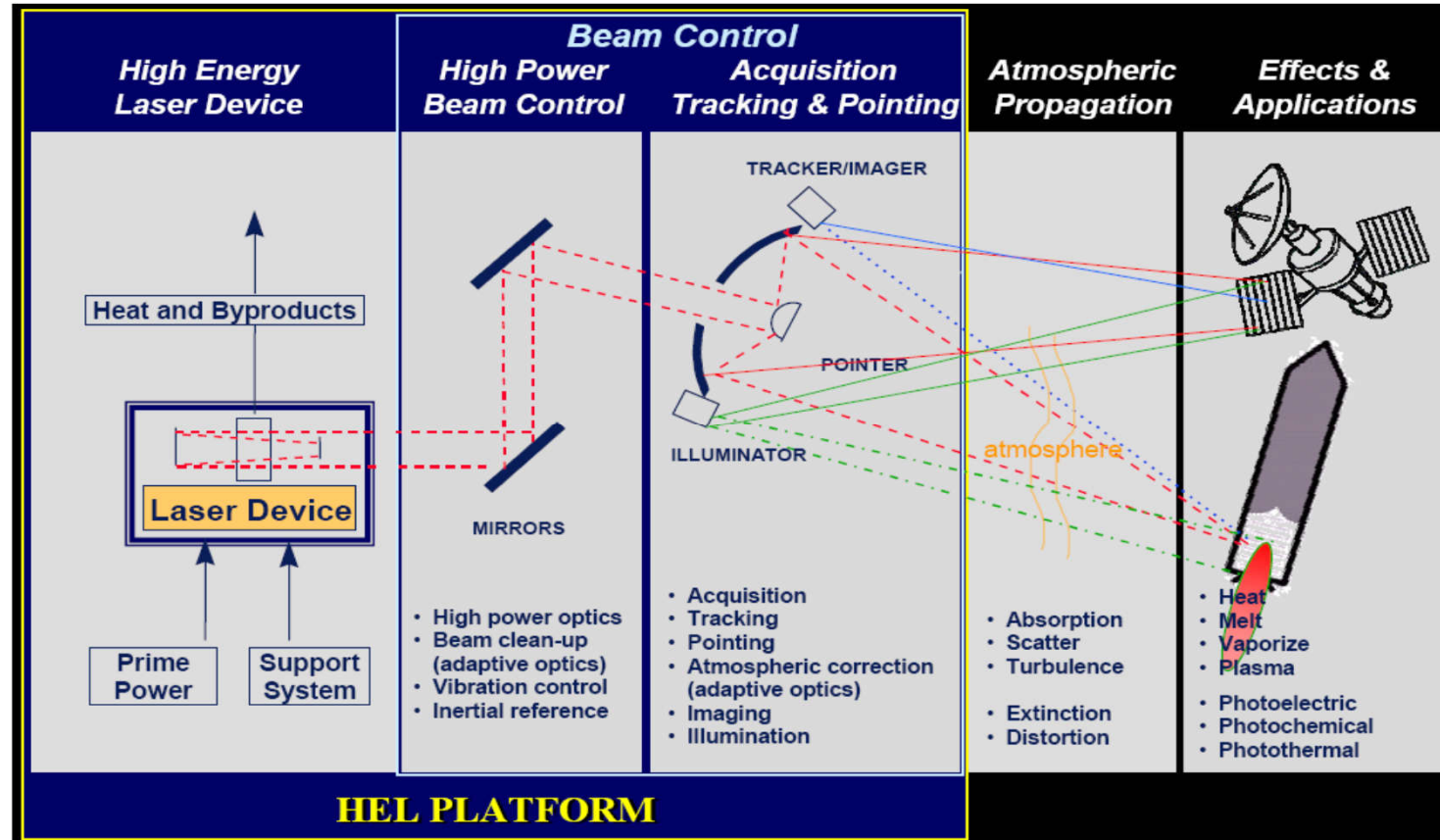
**FIGURE 1.** General Optical Scheme, Assembling, and a Photo of the ASLPE Model.

Yu. A. Rezunkov et al, Performance Characteristics of Laser Propulsion Engine Operating both in CW and in Repetitively-Pulsed Modes, AIP Conf. Proc. **830**: 3 – 13 (2006)

- Traktorstrahl
- gepulst & cw-Betrieb möglich
- CHO-Polymere als Treibstoffe



## Konzeptionelle Überlegungen



J.R. Cook, Atmospheric Applications of High Energy Lasers, Proc. Of XV International Symposium on GCL-HPL 2004 Prague

## Energiebilanz



$$E_{kin} = 1/2 m v^2 = \eta_{prop} \psi^{-1} \alpha \beta \gamma \delta \cdot E_{wall}$$



Antriebseffizienz

$\eta_{prop}$

• Kinetische Energie des Lightcrafts

Mechanische Effizienz

$\psi^{-1}$

• Energiekopplung zum Lightcraft

Expansionseffizienz

$\alpha$

• Kinetische Energie des Treibstoffjets

Absorptionseffizienz

$\beta$

• Innere Energie des Treibstoffes

ggf.:  
Detonation  
Verbrennung

$mQ/E_L$

• Laserpulsenergie am Treibstoff

Transmissionseffizienz

$\gamma$

• Ursprüngliche Laserpulsenergie

Laserwirkungsgrad

$\delta$

• Elektrische Energie





## Constant momentum mission

Dynamische Anpassung:

$$v_{\text{jet}} = v_{\text{rocket}} \\ \text{anstelle von} \\ v_{\text{jet}} = \text{const.}$$

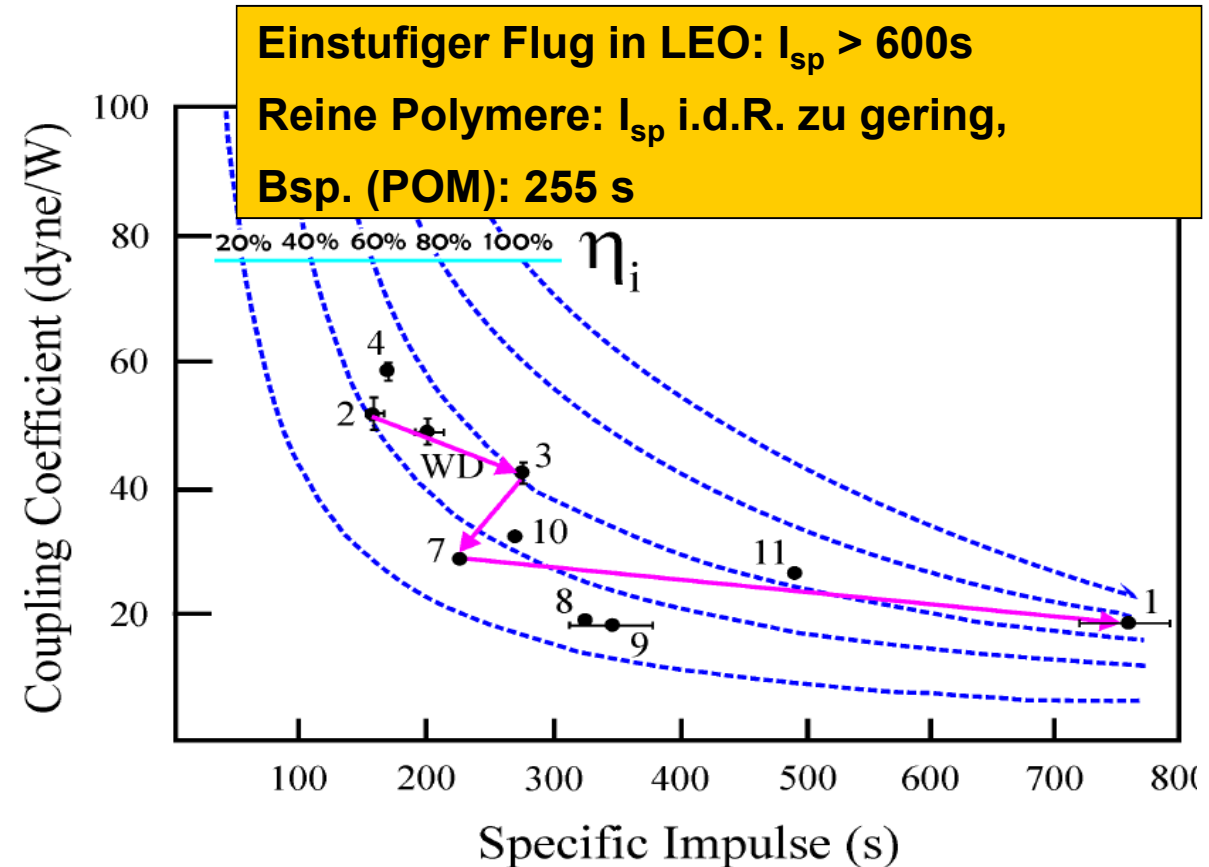
Hohes  $c_m$ : 485 N/MW  
Ammoniumperchlorid (AP)

Hoher  $I_{sp}$ : 754 s  
Teflon (PFTE)

Zeitliche Variation der  
Treibstoffzusammensetzung

Larson, C.W., Mead, F.B, Knecht, S.D., Laser Propulsion and the Constant Momentum Mission, AIP Conf. Proc. **702**, 216 – 227 (2004)

Pakhomov, A.V., Mahaffy, K.E., Binary Solid Propellants for Constant Momentum Missions, AIP Conf. Proc. **997**, 266 – 279 (2008)



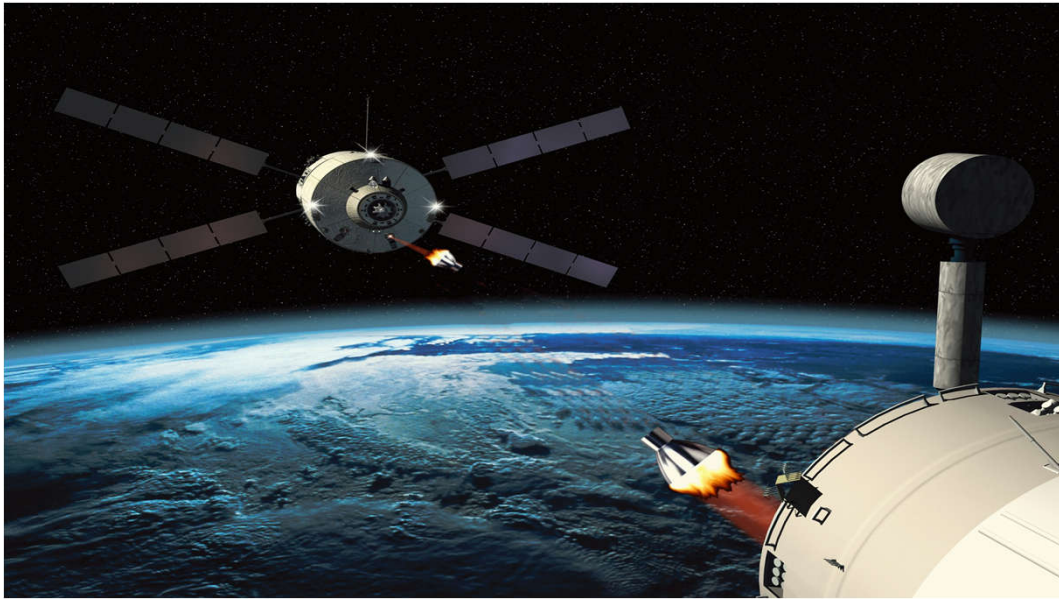


## Systembetrachtungen

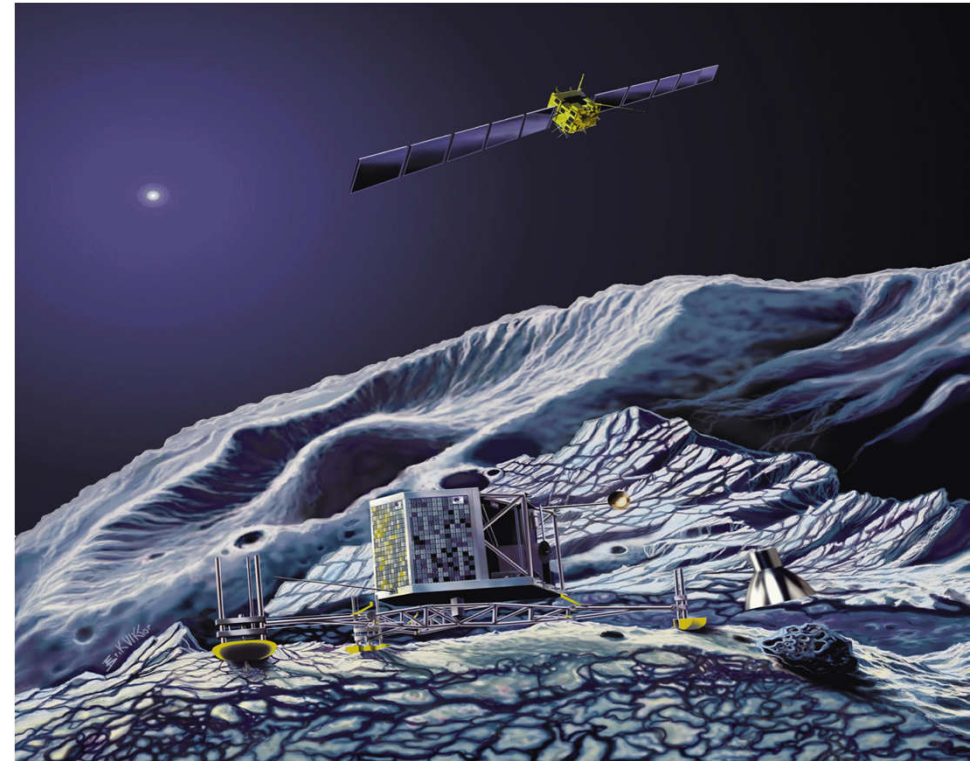
- Teleskop mit einer Reichweite bis zu 1000 km
- adaptive Optik erforderlich
- Mittlere optische Laserleistung:
  - 0,2 ... 1 MW / kg Nutzlast
  - hohe Anfangsinvestition
- Externe Energiequelle:
  - günstiges Masse/Nutzlast-Verhältnis
  - Einfache Antriebstechnologie
  - geringe Startkosten
  - hohe Startfolge



## Weltraumgestützte Alternativen



**Logistische Missionen**



**Probenrücksendung**



# Inhalt

## 1 Einleitung

## 2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Beispiele
- > 2.3 Ausbreitung von Laserstrahlung

## 3 Antriebskonzepte

- > 3.1 Überblick
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > 3.3 Laser Lightcraft

## 4 Zusammenfassung

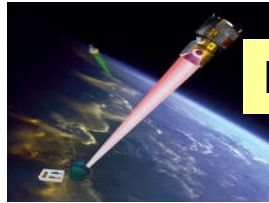




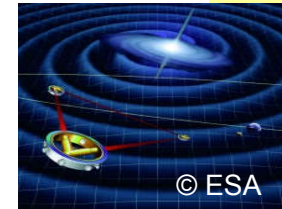
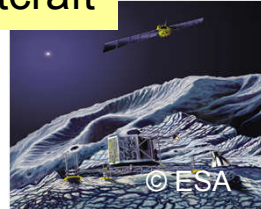
# Skalierung und Anwendungsgebiete



Photonenantrieb



Lightcraft



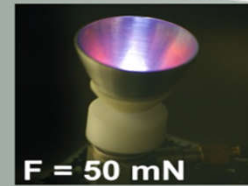
- Mikroantriebe
- Debris removal
- Photovoltaik + Laser



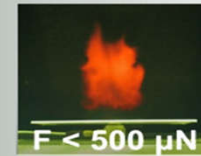
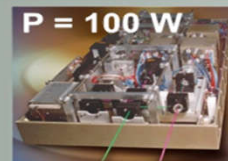
$$c_m = \frac{\text{thrust}}{\text{laser power}}$$



$P = 7.1 \text{ kW}$



$P = 100 \text{ W}$



$P < 1 \text{ W}$



Langfristige Vision

Mittelfristige Anwendung

Derzeitige Entwicklung



## Unkonventionelle Antriebe & Ideen

*Das Brechen von Regeln ist der erste Schritt zur Innovation.*

*Wie wird aus einer Raupe ein Schmetterling? - Erste Aufgabe: Treten Sie nicht drauf.*

*Üben Sie die Erste Hilfe der Ideenrettung: Don't criticize, improve.*

*„Geht nicht!“ heißt oft, dass die Idee nicht verstanden wurde.*

*Das Bekannte zu verlassen, braucht immer außergewöhnliche Kraft.*

*Vor jedem Erfolg steht nicht nur die Bereitschaft zu scheitern, sondern tatsächlich das Scheitern.*

*Alte Ideen stehen neue Ideen immer im Weg. Das Normale ist der Kampf neuer Ideen gegen alte Ex-Ideen.*

*Jeder Mensch hat zu jedem Begriff ein Vorurteil.*

*Wer berechnet, was es kostet, nichts zu riskieren?*

*Martin Gaedt, Rock your idea, Murmann Verlag (2016)*





## Abbildungsnachweis

- DLR – Institut für Technische Physik: Seite 15,20,22-26,34,36,37,40,42,45,46,49,55,56,58,62-67,72-76,78,87-92,95,97,98,100
- Seite 19: Quander Metall- und Lasertechnik, <http://www.quander.de/lasertechnik/>, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
  - Entertainment Weekly, <http://www.telegraph.co.uk/film/star-wars-the-force-awakens/facts-characters-best-scenes/> zuletzt aufgerufen: 12.01.2016
  - EPA (Handout), in Die Presse.com, Aufblasbarer Weltraumaufzug soll 200 Kilometer hoch werden, 19.06.2009 , <http://diepresse.com/home/science/488552/Aufblasbarer-Weltraumaufzug-bis-in-200-Kilometer-Hohe>, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
  - Ascending Technologies, in: online Focus, Mini-Hubschrauber - Verkehrsüberwachung per Fernsteuerung, 01.02.2012, [http://www.focus.de/auto/news/mini-hubschrauber-verkehrsueberwachung-per-fernsteuerung\\_aid\\_709334.html](http://www.focus.de/auto/news/mini-hubschrauber-verkehrsueberwachung-per-fernsteuerung_aid_709334.html), zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
  - Dr. med. Inken Lamcke, Femto- Lasik – PRK, 2013, <http://www.augenarzt-berlin.com/femto-lasik-prk/>, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
  - Nations Wiki, Death Star I, [http://nations.wikia.com/wiki/Death\\_Star\\_I](http://nations.wikia.com/wiki/Death_Star_I), zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
  - Bundeshandelsschule und Bundeshandelsschule Völkermarkt, Photonenantrieb, <http://www.hak-vk.at/index.php?id=2861>, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
- Seite 21: The New York Times, Arthur R. Kantrowitz, Whose Wide-Ranging Research Had Many Applications, Is Dead at 95, 9.12. 2008, [http://www.nytimes.com/2008/12/09/science/09kantrowitz.html?\\_r=0](http://www.nytimes.com/2008/12/09/science/09kantrowitz.html?_r=0), zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
  - Apogee Books, Author Biographies – Leik Myrabo, [http://www.apogeespacebooks.com/Author\\_Bios/leik\\_myrabo.html](http://www.apogeespacebooks.com/Author_Bios/leik_myrabo.html), zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
- Seite 25: NASA – National Space Science Data Center, Sputnik 1, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/database/MasterCatalog?sc=1957-001B>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
  - Smithsonian National Air and Space Museum,
  - Heise Foto, Erich Kapfenberger, Dampflok, <http://www.heise.de/foto/galerie/foto/Dampflok-cc8ca0aab40ec62ada6180479fac5c82/>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
  - Bahnbilder aus dem Rhein-Main-Gebiet, Kai Hesse, [http://www.bahnbilder.net/bilder/03-10-07/IMG\\_6597.jpg](http://www.bahnbilder.net/bilder/03-10-07/IMG_6597.jpg), zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 28: Deutscher Schaustellerbund in: Impulse, 22.11.2013, <http://www.impulse.de/leben/talfahrt-fur-wilde-karusselle-wie-sich-das-geschafft-der-schausteller-verandert>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014
  - Best Greetings, e-Cards, Orkut Scraps, Glitter Graphics 4 All- Copy and Paste, <http://easyscraps.blogspot.de/2010/09/free-emoticons-for-orkut.html>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014
  - SmilieCenter, Big smilies 0031, [http://www.smiliecenter.de/0/big/big\\_smilies\\_0001.htm](http://www.smiliecenter.de/0/big/big_smilies_0001.htm), zuletzt aufgerufen: 17.01.2014



## Abbildungsnachweis

- Seite 32: Wikipedia in [http://www.klangspiel.ch/laser\\_pointer\\_red\\_774/](http://www.klangspiel.ch/laser_pointer_red_774/), zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 33: National Ignition Facility, <https://lasers.llnl.gov/media/photo-gallery>, zuletzt aufgerufen: 27.01.2017,
- RP Photonics Encyclopedia – YAG Lasers, [http://www.rp-photonics.com/yag\\_lasers.html](http://www.rp-photonics.com/yag_lasers.html), zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 35: BATOP Optoelectronics, <http://www.batop.com/information/microchip-laser.html>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 40: Lisa Pathfinder Mission, EADS Astrium, <http://gallery.astrium.eads.net/app/photopro.sk/astrium/detail?docid=92>, zuletzt aufgerufen: 20.01.2014,
- Seite 41: MIT, Archimedes Death Ray: Idea Feasibility Testing, October, 2005, [http://web.mit.edu/2.009/www/experiments/deathray/10\\_ArchimedesResult.html](http://web.mit.edu/2.009/www/experiments/deathray/10_ArchimedesResult.html), zuletzt aufgerufen: 20.01.2014,
- Seite 47: Breakthrough Starshot, <http://breakthroughinitiatives.org/initiative/3>
- Seite 63: Edge-Wave IS-Series, <http://www.edge-wave.de/web/produkte/short-pulse-systeme/is-serie/>, zuletzt aufgerufen: 20.01.2014,
- Seite 64: SFB 716, Laserablation in Metallen, <http://www.sfb716.uni-stuttgart.de/forschung/teilprojekte/projektbereich-b/b5/ergebnisse.html>, zuletzt aufgerufen: 20.01.2014

